Российская академия наук

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 7
2021

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

А.А. Хлыбов, А.Л. Углов. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования 3

Электромагнитные методы

В.В. Дякин, О.В. Кудряшова, В.Я. Раевский. К расчету поля конечного магнитного цилиндра с внутренним соосным цилиндрическим дефектом 11

Ю.Л. Николаев, П.Н. Шкатов, Э.Ф. Ахметшина, А.А. Саморуков. Математическое описание и анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при воздействии нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния над дефектным участком 19

А.В. Гончар, В.А. Клюшников, В.В. Мишакин, М.С. Аносов. Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали 28

Радиационные методы

С.П. Осипов, Х.Д. Мирзоев, С.В. Чахлов, О.С. Осипов, Е.Ю. Усачев. Имитационная модель оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии 37

А.Ю. Гермов, К.Н. Михалёв, Р.В. Скорюнов, И.И. Мильман, Р.М. Абашев, А.И. Сюрдо, А.С. Снегирев, Е.Н. Агданцева. Применение политетрафторэтилена для дозиметрического контроля по данным ЯМР ^{19}F 52

Тепловые методы

П. Багавач, Л. Крстулович-Опара, Ж. Домазет. Улучшение качества ИК-термографического контроля подповерхностных дефектов методом выделения границ 57

А.О. Чулков, Д.А. Нестерук, Б.И. Шагдыров, В.П. Вавилов. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы 67

УДК 620.179.1

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОГО ШУМА ПРИ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ РЭЛЕЯ СТАЛИ 20ГЛ В ПРОЦЕССЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

© 2021 г. А.А. Хлыбов[1,*], А.Л. Углов[1]

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
[*]E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 18.05.2021; после доработки 08.06.2021
Принята к публикации 11.06.2021

Рассматривается возможность подхода к задачам контроля закономерностей упругопластического деформирования стали 20ГЛ методом анализа структурных шумов при использовании поверхностных акустических волн Рэлея. Проанализированы различные алгоритмы математической обработки структурных шумов, используемые различными авторами. На основе современных радиотехнических приемов обработки сигналов предложены уточненные расчетные алгоритмы определения спектрально-энергетических параметров структурных шумов. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенных алгоритмов на образцах широко распространенной в железнодорожном транспорте стали 20ГЛ. Показана достаточно высокая чувствительность предложенных информативных параметров структурного шума к степени пластической деформации одновременно с простотой реализации измерительной методики. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инженерной методики оценки напряжений или степени пластической деформации материала конструкции вне зависимости от того, в каком состоянии — упругом или упругопластическом — он находится, что существенно расширяет возможности акустического метода контроля напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов по сравнению с его велосиметрическим вариантом.

Ключевые слова: ультразвук, поверхностные акустические волны Рэлея, структурный шум, упругопластическое деформирование, энергия шума.

DOI: 10.31857/S0130308221070010

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные акустические волы Рэлея (ПАВР) традиционно используются в дефектоскопии для обнаружения поверхностных дефектов. Однако в последнее время ПАВР нашли применение также в задачах акустической структурометрии [1], при оценке напряжений и остаточных деформаций [2—4], уровня усталостных повреждений [5, 6, Патент на изобретение 2507514 С1. Опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5] и во многих других технических задачах.

Для значительного числа высоконагруженных конструкций накопление эксплуатационных повреждений проходит по механизму роста микропластических деформаций и исчерпания пластичности. В этой связи понятен повышенный интерес современных исследователей к изучению влияния пластической деформации на акустические характеристики материала, в том числе и такие нетрадиционные, как параметры структурного шума (далее — СШ). Структурный шум связан с рассеянием упругих волн на структурных неоднородностях, неметаллических включениях, зернах металла. При этом СШ присутствует как в области зондирующего импульса, так и после прохождения этого импульса.

Существуют различные радиотехнические методы обработки сигналов, содержащих «шумовые» характеристики. Можно выделить такие, как пространственно-временная обработка, оптимизация параметров сканирования [7, 8], вейвлет-фильтрация [10], радиотехнические приемы «выбеливания» СШ [11] и т.д.

Следует отметить, что в современных исследованиях СШ рассматривается не только как помеха, но и как источник информация о структуре материала, по которой можно судить о ее состоянии [11—13]. Проблема состоит в разработке достоверных алгоритмов получения этой информации.

Достоверность упомянутых алгоритмов определяется, во-первых, корректностью используемых математических приемов обработки результатов акустических измерений с целью определения информативных характеристик СШ, а, во-вторых, адекватностью этих характеристик контролируемым параметрам исследуемых материалов.

В работе [14] сформулирован подход к оценке структуры металла по значению интегрального уровня акустических СШ, в качестве которого использовалась их усредненная амплитуда, а также экспериментально показано влияние величины зерна стали 45 на величину предложенной харак-

теристики СШ. Связь СШ с пористостью показана в работе [15]. В работах [16, 17] предложен метод ультразвуковой структуроскопии изделий из сложноструктурных материалов с помощью анализа статистических характеристик СШ. Авторами показано, что комплексный анализ сигнала СШ дает возможность установить связь его энергетического спектра с характером структурных неоднородностей исследуемого материала.

Анализ изменений энергетического спектра СШ в одном и том же материале позволяет реализовать мониторинг изменения его структуры в процессе эксплуатации: если при наблюдении одного и того же объекта в течение времени будет зафиксировано изменение энергетического спектра, то это будет свидетельствовать о появлении деформаций в материале [16].

Вместе с тем отмечено, что для установления устойчивых количественных связей характеристик СШ и параметров структуры конкретных изделий необходимы специальные материаловедческие исследования.

Контролю структуры на основе анализа статистических характеристик обратно рассеянного сигнала посвящены работы [18—22], а также Патент на изобретение 2589751 (С2. Опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19).

Следует отметить, что все шире используемые в настоящее время приемы вейвлет-обработки различных сигналов, в том числе и ультразвуковых импульсов, часто отличаются избыточностью информации, что может быть полезно, например, для нейросетевых моделей в условиях отсутствия внятных физических представлений об исследуемых явлениях. В случае анализа закономерностей упругопластического деформирования акустическим методом, когда природа СШ понятна на уровне строгих физических представлений, вряд ли целесообразно применение алгоритмов вейвлет-анализа. Действительно, энергетический спектр акустического СШ по своей природе заметно не отличается от спектра зондирующего импульса. В этой связи использование вейвлет-анализа для получения количественных характеристик СШ может привести к увеличению погрешностей оценки спектрально-энергетических характеристик, поскольку допущение квазистационарности СШ и обработка его средствами оконного быстрого преобразования Фурье (БПФ) приводит к существенно меньшим погрешностям, чем результаты вейвлет – анализа реальных осциллограмм как нестационарных процессов.

Сравнительный анализ экспериментальных результатов, полученных различными исследователями, показал, что при анализе параметров микроструктуры, микропор, микротрещин и других микроповреждений, обеспечивающих рэлеевский характер рассеяния импульсов мегагерцового диапазона, к числу наиболее информативных характеристик следует отнести параметры энергетического спектра СШ.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма количественной оценки структурного шума при использовании импульсов ПАВР, основанного на расчете его относительной энергии, а также экспериментальная проверка предложенного алгоритма при упругом и упругопластическом деформировании, широко распространенной в железнодорожном транспорте стали 20ГЛ.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ШУМОВ

Для получения необходимых количественных спектрально-энергетических оценок нами использовалось оконное преобразование Фурье сигнала $U(t)$:

$$S(\omega,\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}U(t)W(t-\tau)e^{-\omega t}dt, \tag{1}$$

где $S(\omega, \tau)$ — спектральная плотность, зависящая от частоты ω и временного сдвига τ; $W(t)$ — оконная функция, выбор которой определяется особенностью решаемой задачи и требуемой точностью временного и частотного разрешения.

Дискретный аналог выражения (1) имеет вид:

$$S(\omega_k)=\sum_{n=0}^{N-1}u(n\Delta t)w(n\Delta t)e^{-j\omega_k n\Delta t}, \tag{2}$$

где ω_k — дискретные частоты; $u(n\Delta t)$ — отсчеты сигнала; N — количество эквидистантных отсчетов на интервале наблюдения сигнала T; $w(n\Delta t)$ — отсчеты оконной функции; $w_k=\frac{2\pi}{N\Delta t}k$; $k = 0, 1, \ldots, N-1$, $\Delta t=\frac{T}{N}$ — шаг дискретизации сигнала, обратный частоте дискретизации $f_д$.

При цифровой обработке обычно полагают $\Delta t = 1$, поэтому формулу (2) записывают как

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} u_n w_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}. \tag{3}$$

Главным критерием, предъявляемым к оконной функции, при обработке реализаций СШ является требование максимального подавления растекания спектра (эффект Гиббса). Для удовлетворения этому критерию необходима оптимизация следующих параметров: ширина главного лепестка по уровню –3 дБ, ширина главного лепестка по нулевому уровню, максимальный уровень боковых лепестков, коэффициент ослабления оконной функции.

К одной из лучших по перечисленным критериям относится оконная функция Хэмминга [23]:

$$w_n = \begin{cases} 0{,}53836 - 0{,}46164\cos\dfrac{2\pi}{N}n, & n = 0,1,\ldots N-1 \\ 0, & n \geq N \end{cases}, \tag{4}$$

которую мы и будем использовать.

Одним из наиболее перспективных приемов расчета энергетического спектра СШ является его определение с помощью модифицированной периодограммы методом Уэлча [24], который, как показано в [25], обеспечивает состоятельную оценку величины плотности мощности $P_k = |S_k|^2$.

При разбиении массива значений структурного шума общей длительностью $N_ш$ на N_{seg} сегментов выражение для модифицированной периодограммы примет вид:

$$\Pi_k(i) = \frac{1}{U} \cdot \left| \sum_{n=0}^{N_п - 1} u_n(i) w_n(i) e^{-j\frac{2\pi}{N_п}kn} \right|, \tag{5}$$

где $N_п$ — длительность периодограммы; $i = 1, \ldots, N_{seg}$; $\dfrac{1}{U}$ — весовой коэффициент, введенный Уэлчем:

$$U = \frac{\sum_{n=0}^{N_п - 1} \left| w_n(i) \right|^2}{N_п}. \tag{6}$$

Общее число сегментов N_{seg} зависит от длительности шума $N_ш$, длительности периодограммы $N_п$ и степени перекрытия сегментов t_s, %:

$$N_{seg} = \mathrm{Int}\left[\frac{N_ш - N_п}{N_п\left(1 - \dfrac{t_s}{100}\right)} + 1 \right], \tag{7}$$

где оператор Int означает целую часть выражения в квадратных скобках.

Выражение для спектральной плотности мощности в соответствии с [30] имеет вид;

$$P_k = \frac{1}{N_{seg}} \sum_{i=1}^{N_{seg}} \Pi_k(i). \tag{8}$$

В качестве информативной количественной характеристики структурного шума будем использовать величину относительной энергии:

$$\delta E_ш = \frac{E_ш}{E_\Sigma}, \tag{9}$$

где $E_ш$ — энергия шума, которая рассчитывается по формуле:

$$E_ш = \frac{1}{N_п} \sum_{k=0}^{N_п - 1} P_k, \tag{10}$$

P_k — рассчитывается по формуле (8).

E_Σ — полная энергия шума и сигнала:

$$E_\Sigma = E_ш + E_с, \tag{11}$$

E_c — энергия сигнала, рассчитываемая по формуле:

$$E_c = \sum_{k=0}^{N_c-1} \left| \sum_{n=0}^{N_c-1} u_n w_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right|^2 \quad (12)$$

для оконной функции Хэмминга (4).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Количественную оценку величину относительной энергии структурного шума проводили на образцах из стали 20ГЛ с пределом текучести 210 МПа. Использовали стандартные плоские образцы типа I по ГОСТ 1497 с толщиной рабочей части 5 мм. Шероховатость рабочей поверхности Ra составляла 2,5 мкм по ГОСТ 2589. Измерения повторяли для 5 одинаковых образцов. Каждое измерение повторялось 5 раз с нарушением акустического контакта.

Упругопластическое деформирование образцов осуществляли с помощью испытательной машины фирмы Tinius OIlsen Ltd, модель H100KU.

Акустические измерения проводили с помощью ИВК «АСТРОН» (№ в Государственном реестре средств измерений 67552—17), обеспечивающего возможность прецизионных измерений задержек и амплитуд ультразвуковых импульсов.

Измерения выполняли в моменты остановки верхней траверсы испытательной машины. Кривая растяжения с точками остановки траверсы представлена на рис. 1.

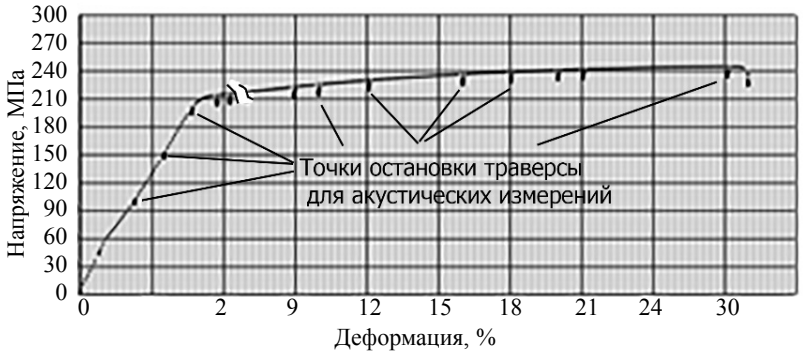

Рис. 1. Кривая растяжения, сталь 20ГЛ.

Импульсы ПАВР с частотой 3 МГц и длительностью приблизительно 2 мкс возбуждали и принимали с применением клиновидного датчика с фиксированной базой измерения (рис. 2). В качестве материала клиновидного датчика использовали органическое стекло. Угол α выбирали равным второму критическому углу. Типичная осциллограмма импульса ПАВР приведена на рис. 3.

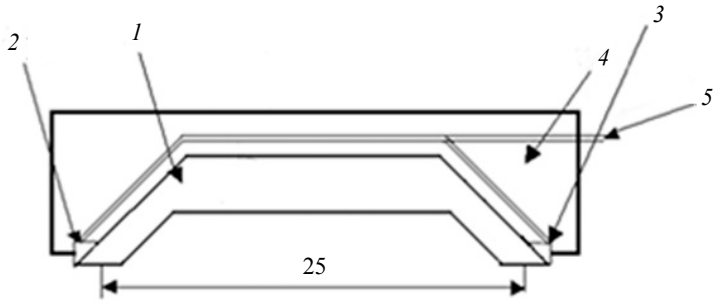

Рис. 2. Конструкция клиновидного датчика поверхностных волн:
1 — двусторонний клин из оргстекла; *2* — излучатель рэлеевских волн; *3* — приемник рэлеевских волн; *4* — корпус; *5* — высокочастотный кабель.

Рис. 3. Осциллограмма сигнала поверхностной волны.

На рис. 3 анализируемая область СШ соответствует рассеянному в направлении распространения волны импульсу.

В рамках разрабатываемого алгоритма обратное рассеяние не учитывается, поскольку его основные параметры (средняя амплитуда, энергия и др.), как показали эксперименты, характеризуются значительным разбросом, практически на порядок превышающим соответствующие величины для прямого рассеяния.

Длительность СШ определяется степенью его затухания до уровня шумов аппаратуры и вычислялась средствами программного обеспечения ИВК «АСТРОН».

Спектральная обработка проводилась с помощь БПФ с числом точек 2^{13}, что при частоте дискретизации 160 МГц соответствует разрешению по частоте 20 кГц.

На рис. 4 приведены типичные энергетические спектры.

На каждой стадии нагружения измерения повторялись 5 раз.

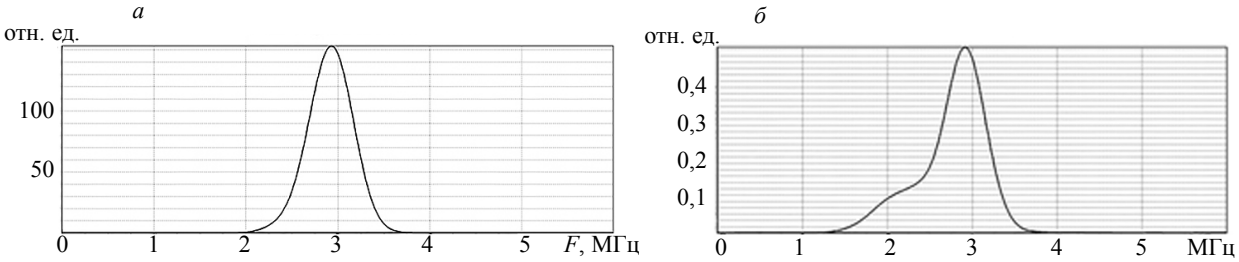

Рис. 4. Типичные энергетические спектры: импульса (*а*) и структурного шума (*б*), полученные для образцов в исходном состоянии.

Результаты измерений относительных значений структурного шума приведены в табл. 1 (упругое деформирование) и 2 (упругопластическое деформирование).

Таблица 1

Упругое деформирование

$\sigma_{ист} \approx \sigma_{усл}$, МПа	0	59	103	160
$<\delta E_ш>\cdot 10^3$	2,75	2,74	2,72	2,75
$\Delta(\delta E_ш)\cdot 10^3$	0,03	0,08	0,04	0,06

В таблицах $<\delta E_ш>$ — среднее значение относительной энергии структурного шума, $\Delta(\delta E_ш)$ — доверительный интервал при доверительной вероятности 95 %. Результаты испытаний показали, что в области упругих деформаций (см. табл. 1) среднее значение относительной энергии структурного шума остается постоянным, в то время как в области упругопластических деформаций (см. табл. 2) относительная энергии структурного шума зависит от величины пластической дефор-

Таблица 2

Упругопластическое деформирование

$\varepsilon_{усл}$,%	0	6,3	7	10	12	16	18	20	21	24	27
$\varepsilon_{ист}$, %	0	6,1	6,8	9,5	11,3	14,8	16,6	18,2	19,1	21,5	23,9
$\sigma_{усл}$, МПа	0	216	218	227	233	236	240	242	244	246	248
$\sigma_{ист}$, МПа	0	229	233	250	260	274	283	290	295	305	314
$<\delta E_{ш}>\cdot 10^3$	2,75	2,91	2,95	3,12	3,24	3,23	3,55	4,06	4,30	5,52	6,32
$\Delta(\delta E_{ш})\cdot 10^3$	0,03	0,07	0,08	0,05	0,09	0,02	0,04	0,04	0,04	0,13	0,04

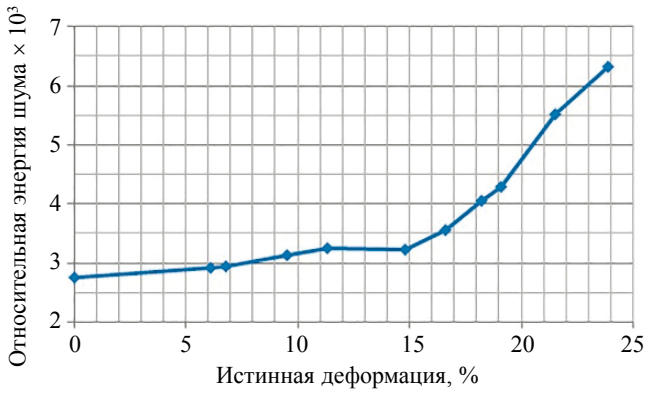

Рис. 5. Влияние пластической деформации на относительную энергию структурного шума.

мации испытываемых образцов. Соответствующий график зависимости для упругопластических деформаций приведен на рис. 5.

При построении графиков использовались истинные значения деформаций $\varepsilon_{ист}$ и напряжений $\sigma_{ист}$, которые на стадии равномерного деформирования выражаются через условные значения $\varepsilon_{усл}$ и $\sigma_{усл}$ следующим образом:

$$\varepsilon_{ист} = \ln(1 + \varepsilon_{усл}), \tag{13}$$

$$\sigma_{ист} = \sigma_{усл}(1 + \varepsilon_{усл}). \tag{14}$$

На рис. 6 приведена кривая зависимости относительной энергии шума от истинного напряжения для всей области упругопластического деформирования.

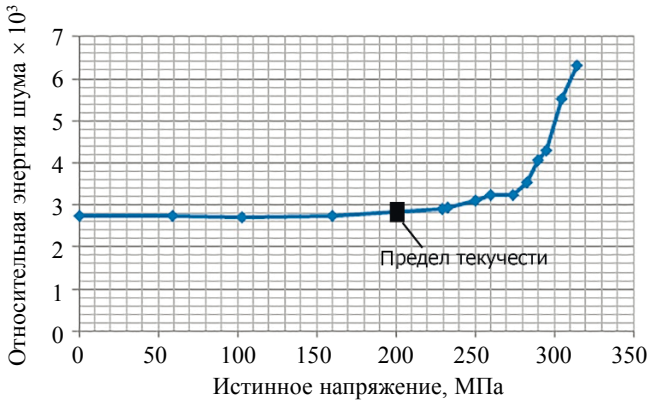

Рис. 6. Зависимость относительной энергии шума от истинного напряжения для всей диаграммы деформирования.

Кривая на рис. 6 позволяет сделать интересный вывод о характере влияния напряжения на используемый параметр $\delta E_{ш}$: вне зависимости от того, находится ли материал в области упругого или упругопластического деформирования, кривая зависимости описывается однозначной функцией:

$$\delta E_{ш} = \begin{cases} \delta E_{ш}(\text{упр}) = \text{const} \text{ для } 0 \le \sigma_{ист} < \sigma_{т} \\ f_1(\sigma_{ист}) \text{ или } f_2(\varepsilon_{ист}) \text{ для } \sigma_{ист} \ge \sigma_{т} \end{cases}, \quad (15)$$

где $\sigma_{т}$ — физический предел текучести, аппроксимирующие функции $f_1(\sigma_{ист})$ и $f_1(\varepsilon_{ист})$ легко подбираются методом наименьших квадратов.

При практическом использовании предлагаемого алгоритма для реального конструктивного элемента или полуфабриката из стали 20ГЛ аппроксимирующие зависимости (15) с учетом погрешностей определения предложенного информативного параметра структурного шума, приведенных в табл. 1 и 2, позволят определить параметры напряженно-деформированного состояния материала в упругопластической области, что чрезвычайно важно для решения как технологических задач, так и задач безопасной эксплуатации различных объектов.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы современные подходы к обработке ультразвуковых сигналов, содержащих некоррелированную составляющую в виде структурного шума.

2. Предложен вариант количественной оценки структурного шума при использовании импульсов ПАВР, основанный на расчете относительной энергии структурного шума с использованием оконного преобразования Фурье и модифицированного метода периодограмм Уэлча.

3. Экспериментально показано, что упругие напряжения не влияют на величину структурного шума при использовании ПАВР, что соответствует выводам работ [26, 27].

4. Пластическая деформация оказывает существенное влияние на величину структурного шума, начиная с предела текучести, что может быть связано с известными процессами увеличения пространственной неоднородности пластически деформируемых поликристаллов на мезоуровне.

5. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инженерной методики оценки напряжений или степени пластической деформации материала конструкции вне зависимости от того, в каком состоянии — упругом или упругопластическом — он находится, чего не позволяют сделать велосимметрические методы вследствие одновременного (разнонаправленного — в зависимости от вида напряженного состояния) влияния на скорость звука упругих и пластических деформаций.

Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Крысько Н.В., Краснов И.С., Прилуцкий М.А., Смородинский Я.Г.* О возможности применения поверхностных и головных ультразвуковых волн при неразрушающем контроле качества изделий аддитивного производства // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 16—23.

2. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Родюшкин В.М.* Оценка механических напряжений в элементах конструкций с помощью поверхностных волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическими преобразователями // Вестник научно-технического развития. 2017. № 8 (120). С. 29—39.

3. *Углов А.Л., Хлыбов А.А., Кувшинов М.О.* О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 22. № 4. С. 3—9. DOI 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9

4. *Eryi Hu, Yming He, Yanming Chen* Experimental Study on the surface stress measurement with Rayleigh wave technique // Applied Acoustics. 2009. V. 70. N 2. P. 356—360.

5. *Антонов А.М., Ерофеев В.И., Леонтьева А.В.* Влияние поврежденности материала на распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 3. С. 293—300.

6. *Murav'ev V.V. , Gushchina L.V.* Evaluating Damage Accumulated in Car Wheelset Axle Journals by the Ultrasonic Method Using Rayleigh and Head Waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 10. P. 713—722. [*Муравьев В.В., Гущина Л.В., Казанцев С.В.* Оценка накопленной поврежденности

шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 14—23.]

7. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Туркин М.В.* Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 71—86.

8. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Концов Р.В., Синицын А.А.* Выбор параметров пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковой структуроскопии чугунных изложниц, подвергшихся термоциклированию // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 42—50.

9. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В.* Структурный шум в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 186 с.

10. *Bazulin E.G., Konovalov D.A.* Applying the Whitening Transformation to Echo Signals for Reducing Pattern Noise in Ultrasonic Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 11. P. 791—802. [*Базулин Е.Г.* Применение процедуры «выбеливания» эхосигналов для уменьшения уровня структурного шума при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. № 11. 2019. С. 3—15.]

11. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В., Дедов А.И.* Методика определения акустических структурных шумов металла // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1. С. 143—148.

12. *Артамонов В.В., Артамонов В.П.* Неразрушающий контроль микроструктуры металла теплоэнергетического оборудования // Дефектоскопия. 2002. № 2. С. 34—43.

13. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2008. 864 с.

14. *Муравьев В.В., Котоломов А.Ю., Байтеряков А.В., Дедов А.И.* Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 11. С. 65—69.

15. *Пермикин В.С., Перов Д.В., Ринкевич А.Б.* Акустические шумы в стали 12Х1МФ, содержащей микропоры // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 14—28.

16. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Шалимова Е.В., Концов Р.В., Воронкова Л.В.* Ультразвуковая структуроскопия изделий из сложноструктурных материалов на основе анализа статистических характеристик структурного шума // Дефектоскопия. 2015. № 6. С. 41—56.

17. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Шалимова Е.В., Концов Р.В., Воронкова Л.В.* Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 19— 32.

18. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Обработка обратно рассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 11—16.

19. *Романишин Р.І., Іваницький Я.Л., Кошовий В.В., Штаюра С.Т., Романишин І.М., Мокрий О.М., Семак П.М.* Ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі зворотньо розсіяного сигналу // ТДНК. 2017. № 2. С. 42—49.

20 *Муравьев В.В., Байтеряков А.В.* Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 50—58.

21. *Кошевой В.В., Романишин И.М., Романишин Р.И., Шарамага Р.В.* Оценка деградации материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 33—49.

22. *Dorval V., Jenson F., Corneloup G.* Accounting for structural noise and attenuation in the modeling of the ultrasonic testing of polycrystalline materials // Review of Progress in QNDE. 2010. V. 29. P. 1309—1316.

23. *Хэмминг Р.В.* Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987. 221 с.

24. *Welch P.* The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoust. 1967. V. 15. P. 70—73.

25. *Бычков Б.И., Кудряшов Н.И., Гуренко В.В.* Качественная оценка некоторых методов спектрального анализа // Радиоэлектроника. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 01. С. 34—36. DOI: 10.24108/rdopt.0117.0000094

26. *Муравьев В.В., Байтеряков А.В., Дедов А.И., Муравьева О.В., Леньков С.В.* Оценка уровня акустических структурных шумов при одноосном растяжении плоских образцов трубной стали 09Г2С после различной термической обработки // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 40—46.

27. *Муравьев В.В., Леньков С.В., Дедов А.И., Байтеряков А.В., Котоломов А.Ю.* Влияние одноосного растяжения образцов стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2016. № 2. С. 118—122.

УДК 620.179.14

К РАСЧЕТУ ПОЛЯ КОНЕЧНОГО МАГНИТНОГО ЦИЛИНДРА С ВНУТРЕННИМ СООСНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ДЕФЕКТОМ

© 2021 г. В. В. Дякин[1,*], О. В. Кудряшова[1,], В. Я. Раевский[1,***]**

[1]Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620137 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail:[*]dyakin@imp.uran.ru;[**]kudryashova_ov@imp.uran.ru; [***]ravskii@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021; после доработки 18.05.2021
Принята к публикации 21.05.2021

С помощью сеточного метода проведено численное решение прямой задачи магнитостатики по вычислению поля конечного цилиндра с постоянной магнитной проницаемостью, содержащего внутреннее включение в виде соосного цилиндра с иной магнитной проницаемостью. Алгоритм создан для произвольного внешнего поля. С целью оценки достоверности и точности метода решения проведено тестирование результатов с помощью точно решаемых задач. Также проведено сравнение с результатами ранее решенной задачи о конечном бездефектном цилиндре. Построены координатные зависимости компонент результирующего поля при различных исходных данных. Программа пополняет библиотеку задач магнитного контроля и может быть использована для качественной сверки с результатами модельных экспериментов, а также для оценки геометрических характеристик внутреннего дефекта.

Ключевые слова: дефектоскопия, теоретические задачи магнитного контроля, магнитостатика, основное уравнение магнитостатики, сеточный метод, магнитный цилиндр с дефектом.

DOI: 10.31857/S0130308221070022

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] был реализован алгоритм приближенного численного решения прямой линейной задачи магнитостатики для расчета компонент результирующего поля конечного цилиндра, находящегося в произвольном стационарном внешнем поле. В основу легло интегро-дифференциальное уравнение магнитостатики [2, 3], преобразованное для случая постоянной магнитной проницаемости: в результате трехмерное уравнение сводится к двумерному, содержащему интеграл по поверхности магнетика, подынтегральная функция которого содержит нормальную составляющую искомого поля. Данное уравнение обращается в выражение по расчету поля в произвольной точке пространства (за исключением граничных точек магнетика), если нормальная составляющая на границе оказывается известной. Уравнение для этой нормальной составляющей выводится из основного уравнения. Для решения задачи в [1] была применена процедура дискретизации. Так, интегральное уравнение было сведено к системе линейных алгебраических уравнений относительно значений искомой функции на фрагментах разбиений. Далее на основе решения системы были записаны выражения для расчета напряженности результирующего поля в произвольной точке пространства. Алгоритм был протестирован на точно решаемых задачах, путем численных экспериментов было установлено, что в широком диапазоне изменения входных данных имеет место стабилизация двух или трех значащих цифр окончательного результата. Кроме того, был осуществлен подбор оптимальных параметров разбиения, позволяющих получать решение за вполне приемлемое время.

В следующей работе над задачей в той же самой постановке [4] был использован более совершенный подход: с помощью достаточно объемных аналитических преобразований с использованием основных свойств гипергеометрических функций и функций Лежандра решение основного трехмерного магнитостатического уравнения для указанной конфигурации сведено к решению некоторого количества систем трех одномерных линейных интегральных уравнений. Преимущества по сравнению с работой [1] несомненны: понижение размерности уравнений обеспечивает возможность получения результата более высокой точности со значительно меньшими затратами машинного времени — программа [4] выдает результат за несколько секунд, тогда как программа [1] работает минут двадцать. В этой связи интересно ознакомиться с деталями работы над задачей с аналогичной постановкой при ее реализации с помощью стандартных программ типа Ansys, Elcut и других. Узнать об этом пока не удалось.

Настоящая работа выполнена в развитие примененной в [1] методики на случай, когда внутри магнитного цилиндра находится дефектная область с иной магнитной проницаемостью. Разработка подходов к решению задачи магнитостатики для дефектных тел конечного размера несомненно

является актуальной. Подавляющее большинство теоретических задач магнитного контроля решено для неограниченных геометрических моделей тел с неограниченными либо конечными формами внутренних дефектов. Известна только одна задача о конечном теле с конечным дефектом — задача о магнитном шаре с произвольно расположенным шаровым включением [5].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется магнетик, ограниченный замкнутой поверхностью S, внутри которого располагается иной магнетик (дефект), ограниченный замкнутой поверхностью S_d. Область, заключенную между поверхностями S и S_d, обозначим через Ω и положим, что внутри нее магнитная проницаемость постоянна и равна μ. Область внутри S_d обозначим через Ω_d и положим, что здесь магнитная проницаемость также постоянна и равна μ_d. Немагнитную часть пространства обозначим через Ω_0 — здесь магнитная проницаемость равна единице. Далее примем, что внешнее намагничивающие поле описывается некой функцией $\mathbf{H}^0(\mathbf{r})$, $\mathbf{r}\in\mathbb{R}^3$. Описанная общая постановка иллюстрируется рис. 1.

Вектор-функция напряженности магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ подчиняется уравнению — следствию из основного уравнения магнитостатики, полученному при условии постоянства магнитной проницаемости, которое в рамках принятых условий имеет вид:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r})+\frac{\mu-1}{4\pi}\nabla\int_S\frac{H_n^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\mu-1}{4\pi}\nabla\int_{S_d}\frac{H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'+\frac{\mu_d-1}{4\pi}\nabla\int_{S_d}\frac{H_{n_d}^{\Omega_d}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=\mathbf{H}^0(\mathbf{r}), \tag{1}$$

где $\mathbf{r}\in\Omega\backslash\{S\bigcup S_d\}$. В (1) под интегралы входят функции $H_n^\Omega(\mathbf{r}')=\left(\mathbf{H}^\Omega(\mathbf{r}'),\mathbf{n}\right)$ и т.п. — так были обозначены значения нормальной составляющей вектора напряженности поля на поверхности интегрирования вдоль вектора, указанного в нижней подписи к основному символу, и изнутри области, указанной в верхней подписи. Через $\mathbf{n}$ обозначен единичный вектор нормали, построенный на поверхности S и направленный изнутри области Ω, а через $\mathbf{n}_d$ — единичный вектор нормали на поверхности S_d, направленный изнутри Ω_d (рис.1). Учитывая, что на S_d выполняется граничное условие $\mu H_{n_d}^\Omega=\mu_d H_{n_d}^{\Omega_d}$, упрощаем (1) и записываем рабочее уравнение:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r})+\frac{\mu-1}{4\pi}\nabla\int_S\frac{H_n^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\mu-\mu_d}{4\pi\mu_d}\nabla\int_{S_d}\frac{H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=\mathbf{H}^0(\mathbf{r}),\ \mathbf{r}\in\Omega\setminus\{S\bigcup S_d\}, \tag{2}$$

из которого видно, что для определения вектора напряженности магнитного поля в произвольной точке пространства необходимо найти две функции — его нормальные составляющие изнутри Ω на поверхностях S и S_d соответственно.

Для получения системы интегро-дифференциальных уравнений относительно $H_n^\Omega(\mathbf{r})$ и $H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r})$ в (2) положим $\mathbf{r}\in\Omega$ и скалярно умножим обе его части на векторы $\mathbf{n}$ и $\mathbf{n}_d$. Получим:

$$\begin{cases} H_n^\Omega(\mathbf{r})+\dfrac{\mu-1}{4\pi}\dfrac{\partial}{\partial n}\displaystyle\int_S\frac{H_n^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\mu-\mu_d}{4\pi\mu_d}\frac{\partial}{\partial n}\int_{S_d}\frac{H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=H_n^0(\mathbf{r});\\ H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r})+\dfrac{\mu-1}{4\pi}\dfrac{\partial}{\partial n_d}\displaystyle\int_S\frac{H_n^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\mu-\mu_d}{4\pi\mu_d}\frac{\partial}{\partial n_d}\int_{S_d}\frac{H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=H_{n_d}^0(\mathbf{r}). \end{cases} \tag{3}$$

Здесь совершим предельные переходы: в первом уравнении — на поверхность S, во втором — на S_d. Здесь следует действовать, используя свойства нормальной производной потенциала простого слоя [6]. После преобразований приходим к системе интегральных уравнений относительно функций $H_n^\Omega(\mathbf{r})$ и $H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r})$, определенных на поверхностях S и S_d соответственно. Получим:

$$\begin{cases} H_n^\Omega(\mathbf{r})+\dfrac{\chi}{2\pi}\displaystyle\int_S H_n^\Omega(\mathbf{r}')\frac{\partial}{\partial n}\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\chi_1}{2\pi}\int_{S_d}H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')\frac{\partial}{\partial n}\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=\frac{2}{\mu+1}H_n^0(\mathbf{r}),\mathbf{r}\in S;\\ H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r})+\dfrac{\chi_2}{2\pi}\displaystyle\int_S H_n^\Omega(\mathbf{r}')\frac{\partial}{\partial n_d}\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS'-\frac{\chi_d}{2\pi}\int_{S_d}H_{n_d}^\Omega(\mathbf{r}')\frac{\partial}{\partial n_d}\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_d'=\frac{2\mu_d}{\mu+\mu_d}H_{n_d}^0(\mathbf{r}),\mathbf{r}\in S_d, \end{cases} \tag{4}$$

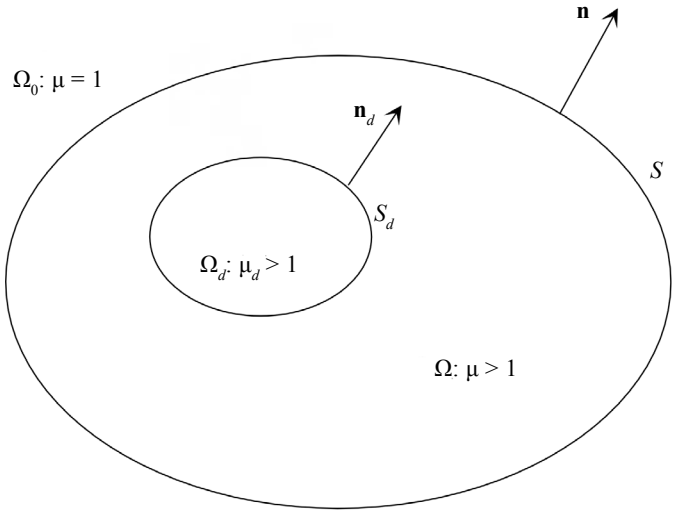

Рис. 1.

где введены обозначения: $\chi := \dfrac{\mu-1}{\mu+1}, \chi_1 := \dfrac{\mu-\mu_d}{\mu_d(\mu+1)}, \chi_2 := \dfrac{\mu_d(\mu-1)}{\mu+\mu_d}, \chi_d := \dfrac{\mu-\mu_d}{\mu+\mu_d}$.

Далее примем, что геометрический образ рассматриваемого тела соответствует представленному на рис. 2. Положим, что дефектное тело является конечным цилиндром, ограниченным поверхностью $S = S_1 \bigcup S_2 \bigcup S_3$, где:

$$S_1 = \left\{(x,y,z) : x^2 + y^2 = \rho_0^2; z \in [-h_1, h_2]\right\};$$

$$S_2 = \left\{(x,y,z) : x^2 + y^2 \le \rho_0^2; z = -h_1\right\};$$

$$S_3 = \left\{(x,y,z) : x^2 + y^2 \le \rho_0^2; z = h_2\right\}.$$

Внутри S располагается поверхность $S_d = S_4 \bigcup S_5 \bigcup S_6$, где:

$$S_4 = \left\{(x,y,z) : (x-x_d)^2 + y^2 = \rho_d^2; z \in [h_3, h_4]\right\};$$

$$S_5 = \left\{(x,y,z) : (x-x_d)^2 + y^2 \le \rho_d^2; z = h_3\right\};$$

$$S_6 = \left\{(x,y,z) : (x-x_d)^2 + y^2 \le \rho_d^2; z = h_4\right\}.$$

Нормаль к поверхности S_i (i = 1, …, 6) обозначим через $\mathbf{n}_i$. Так, система (4) будет состоять из шести уравнений:

$$\begin{cases} H_{n_i}^{\Omega}(\mathbf{r}) + \dfrac{\chi}{2\pi}\sum\limits_{j=1}^{3}\int\limits_{S_j} H_{n_j}^{\Omega}(\mathbf{r}')\dfrac{\partial}{\partial n_i}\dfrac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_j' - \dfrac{\chi_1}{2\pi}\sum\limits_{j=4}^{6}\int\limits_{S_j} H_{n_j}^{\Omega}(\mathbf{r}')\dfrac{\partial}{\partial n_i}\dfrac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_j' = \dfrac{2}{\mu+1}H_{n_i}^{0}(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in S_i,\ i = 1,2,3; \\ H_{n_i}^{\Omega}(\mathbf{r}) + \dfrac{\chi_2}{2\pi}\sum\limits_{j=1}^{3}\int\limits_{S_j} H_{n_j}^{\Omega}(\mathbf{r}')\dfrac{\partial}{\partial n_i}\dfrac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_j' - \dfrac{\chi_d}{2\pi}\sum\limits_{j=4}^{6}\int\limits_{S_j} H_{n_j}^{\Omega}(\mathbf{r}')\dfrac{\partial}{\partial n_i}\dfrac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}dS_j' = \dfrac{2\mu_d}{\mu+\mu_d}H_{n_i}^{0}(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in S_i,\ i = 4,5,6. \end{cases} \quad (5)$$

Всякую поверхность S_i = (i = 1, …, 6) разбиваем на N_i фрагментов $\{S_{im}\}_{m=1}^{N_i}$, а через $\mathbf{r}_{im}$ обозначим радиус-вектор центра площадки S_{im}. Примем, что на значение искомой нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля на всякой площадке S_{im} является постоянным, эту постоянную обозначим через $H_{n_i}^{\Omega}(\mathbf{r}_{im})$. Таким образом, система (5) сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно этих значений:

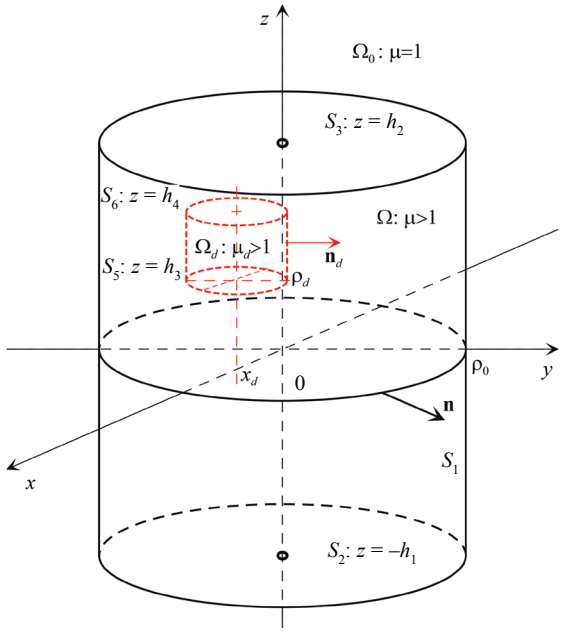

Рис. 2.

$$\begin{cases} H_{n_i}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{im}\right)+\dfrac{\chi}{2\pi}\sum\limits_{j=1}^{3}\sum\limits_{k=1}^{N_j}H_{n_j}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{jk}\right)\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}-\dfrac{\chi_1}{2\pi}\sum\limits_{j=4}^{6}\sum\limits_{k=1}^{N_j}H_{n_j}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{jk}\right)\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}=\dfrac{2}{\mu+1}H_{n_i}^{0}\left(\mathbf{r}_{im}\right),\ i=1,2,3; \\ H_{n_i}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{im}\right)+\dfrac{\chi_2}{2\pi}\sum\limits_{j=1}^{3}\sum\limits_{k=1}^{N_j}H_{n_j}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{jk}\right)\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}-\dfrac{\chi_d}{2\pi}\sum\limits_{j=4}^{6}\sum\limits_{k=1}^{N_j}H_{n_j}^{\Omega}\left(\mathbf{r}_{jk}\right)\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}=\dfrac{2\mu_d}{\mu+\mu_d}H_{n_i}^{0}\left(\mathbf{r}_{im}\right), i=4,5,6, \end{cases} \tag{6}$$

где

$$\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}:=\int\limits_{S_{jk}}\left(\frac{\partial}{\partial n_i}\frac{1}{\left|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\right|}\right)_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_{im}}dS'_{jk}, \tag{7}$$

$i = 1, \ldots, 6; j = 1, \ldots, 6; m = 1, \ldots, N_i; k = 1, .., N_j$.

Матричные элементы $\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}$ распределяются по 36-и блокам: фиксируя точку $\mathbf{r}_{im}$ на i-й поверхности, проводим интегрирование по фрагменту S_{jk} на j-й поверхности. Все интегралы могут быть взяты и вычислены. Однако численные эксперименты, выполненные в ходе работы над задачей о цилиндре без дефекта [1], показали, что брать все интегралы нет необходимости: при большой плотности разбиения фрагменты интегрирования становятся сравнительно малыми, и для вычисления интегралов с хорошей точностью работает формула среднего значения. Такой подход приемлем для вычисления матричных элементов вида $\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}$, где $i \neq j$ — в таком случае область интегрирования не содержит особую точку. Не будем подробно расписывать очевидные действия по получению расчетных формул для $\mathrm{A}_{mk}^{(i,j)}$ при $i \neq j$. Не будем приводить и окончательные столь же очевидные формулы, чтобы не загромождать текст статьи.

Если же фрагменты содержат особую точку $\mathbf{r}_{im}$, что случается, если она находится на той же самой площадке, по которой ведется интегрирование, то тогда необходимо корректно взять несобственный интеграл. Матричные элементы такого рода имеют вид:

$$\mathrm{A}_{mm}^{(1,1)}=-\frac{2\delta_z}{\sqrt{4\rho_0^2+\delta_z^2}}\left(F\left(\frac{\pi+\delta_\varphi}{2},\lambda\left(\rho_0\right)\right)-F\left(\frac{\pi-\delta_\varphi}{2},\lambda\left(\rho_0\right)\right)\right);$$

$$\mathrm{A}_{mm}^{(4,4)}=-\frac{2\delta_z}{\sqrt{4\rho_d^2+\delta_z^2}}\left(F\left(\frac{\pi+\delta_\varphi}{2},\lambda\left(\rho_d\right)\right)-F\left(\frac{\pi-\delta_\varphi}{2},\lambda\left(\rho_d\right)\right)\right),$$

где $\lambda(t) := \dfrac{4t^2}{4t^2 + \delta_z^2}$; δ_z и δ_φ — полушаги разбиения по полярным координатам z и φ на поверхностях S_1 и S_4 (могут отличаться для разных поверхностей в силу выбора); $F(\varphi, \lambda)$ — неполный эллиптический интеграл первого рода:

$$F(\varphi, \lambda) := \int_0^{\varphi} \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \tau}}.$$

Далее $\mathrm{A}_{mk}^{(i,i)} = 0$ для всех значений m и k при $i = 2, 3, 5, 6$.

После того, как решение системы найдено, находим напряженность результирующего поля. Выражение для вектора $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ записываем исходя из (2):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0(\mathbf{r}) - \frac{\mu - 1}{4\pi} \sum_{i=1}^{3} \sum_{m=1}^{N_i} H_{n_i}^{\Omega}(\mathbf{r}_{im}) \nabla \int_{S_{im}} \frac{dS'_{im}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} + \frac{\mu - \mu_d}{4\pi\mu_d} \sum_{i=4}^{6} \sum_{m=1}^{N_i} H_{n_i}^{\Omega}(\mathbf{r}_{im}) \nabla \int_{S_{im}} \frac{dS'_{im}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \tag{8}$$

где $\mathbf{r} \in \Omega \setminus \{S \cup S_d\}$.

3. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Вышеописанный алгоритм был запрограммирован на языке FORTRAN. Для решения системы линейных алгебраических уравнений была использована зарекомендовавшая себя стандартная программа из [7] с оценкой числа обусловленности матрицы системы. Матричные элементы (7) вычислялись описанным в предыдущем пункте способом. На основе (8) были записаны интегральные выражения для вычисления полярных и декартовых компонент результирующего поля, при этом интегралы по фрагментам разбиений вычислялись с помощью формулы о среднем значении двойного интеграла. Величины размерности длины были нормированы к диаметру большого цилиндра, полевые величины на рисунках — к модулю вектора напряженности постоянного внешнего поля. Заметим, что алгоритм можно использовать и в случае, если внешнее поле зависит от координат, но мы не рассматривали примеры, отвечающие этой возможности.

Вообще говоря, всякий алгоритм численного решения должен быть протестирован на предмет теоретической достоверности и на предмет точности решения. Сеточные методы, к которым относится и используемый в настоящей работе, весьма громоздки. Поскольку аналитическая работа минимальна и приближения принимаются на стадии записи уравнений, точность таких методов невысока и, как правило, ее трудно оценить заранее — только в ходе численных экспериментов можно составить понимание о ее количественном значении. Тестирование на достоверность и точность осуществлялось как при решении системы, так и при вычислении компонент результирующего поля.

Конфигурация элементов разбиения и их размеры устанавливались согласно результатам, полученным в работе [1]. Дополнительные проверки, выполненные уже с помощью новой программы, подтверждают возможность использования рекомендаций из [1]. С увеличением плотности разбиения растет количество стабильных значащих цифр решения: в нашем случае в зависимости от выбранных параметров оно невелико — колеблется от двух до четырех. Однако существует порог, при переходе через который рост числа стабильных цифр приостанавливается. При этом матричные элементы уменьшаются в абсолютном значении, что приводит к увеличению числа обусловленности матрицы системы, и на выходе после длительных расчетов получаем результат сомнительной точности. Здесь необходимо соблюсти меру, которая устанавливается в результате многих численных экспериментов.

Наиболее подходящими оказываются разбиения, в которых на единицу длины приходится от 10 до 15 точек. Дефект можно разбить плотнее. Так, чаще, если не оговорено особо, принимаем для основного цилиндра с радиусом $\rho_0 = 0{,}5$ и высотой $h_1 + h_2$ от 3,0 до 6,0 сетку на поверхности S_1, в которой от 40 до 60 точек по оси $0z$, столько же точек по окружности. Разбиение граней S_2 и S_3 производилось окружностями и лучами: при указанных параметрах была принята сетка с тем же числом лучей, что и для S_1 и с числом дуг от 10 до 20. При этом на компьютере со скромными возможностями программа работает от пяти до двадцати минут.

В нашем случае для проверки результатов использованы следующие эталоны.

1) Задача о бесконечной магнитной трубе, такой, где $x_d = 0$; если внешнее намагничивающее поле абсолютной величины H^0 направлено вдоль оси $0x$, то тогда в принятых обозначениях нормальные составляющие на цилиндрических поверхностях изнутри области S_1 имеют вид:

$$H_{\rho}^{S_1}\left(\rho_0,\varphi\right)=\frac{2}{\mu+1}\cdot\frac{1-\chi_d\lambda^2}{1-\chi\chi_d\lambda^2}\cos\varphi \quad \text{и} \quad H_{\rho}^{S_1}\left(\rho_d,\varphi\right)=\frac{2\mu_d}{\mu+\mu_d}\frac{1-\chi}{1-\chi\chi_d\lambda^2}\cos\varphi, \tag{9}$$

а компоненты результирующего поля вне трубы выражаются формулами:

$$\begin{aligned} H_{\rho}\left(\rho,\varphi\right)&=H^0\left(1+\frac{\chi-\chi_d\lambda^2}{1-\chi\chi_d\lambda^2}\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2\right)\cos\varphi;\\ H_{\varphi}\left(\rho,\varphi\right)&=H^0\left(-1+\frac{\chi-\chi_d\lambda^2}{1-\chi\chi_d\lambda^2}\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2\right)\sin\varphi, \end{aligned} \tag{10}$$

где $\lambda := \rho_d/\rho_0$.

2) Задача о бесконечном магнитном цилиндре с несоосным, также бесконечным цилиндрическим дефектом. Устойчивый алгоритм ее решения, допускающий получение результата с заведомо большим числом верных значащих цифр, нежели в настоящей работе, представлен в [8], он ранее был нами запрограммирован, и теперь мы обращаемся к этой программе для уяснения соответствий с новой задачей. В качестве теста можно использовать и результаты точного решения этой же задачи, полученные в биполярной системе координат [9].

3) Задача о конечном магнитном цилиндре без дефекта [1]. Это более слабый эталон, поскольку точность решения в данном случае сопоставима с таковой для настоящей задачи о конечном цилиндре с дефектом.

Для сравнения с решением задачи 1 для бесконечной трубы были проведены расчеты при различных значениях параметров h_1 и h_2, при этом размеры дефекта выбирались таким образом, чтобы имитировать фрагмент бесконечной трубы. При проведении численных экспериментов мы интересовались значением нормальной составляющей (т.е. результатом решения системы (6)) на поверхностях раздела вблизи плоскости $z = 0$. Также сверялись и значения компонент результирующего поля при $z = 0$. Была обнаружена устойчивая сходимость результатов численного решения к аналитическому при увеличении длин внешнего и внутреннего цилиндров.

Были выполнены и многочисленные сверки с решением задачи 2, в ходе которых проявилась устойчивая сходимость к аналитическому решению в широком диапазоне изменения параметров задачи. По результатам численных экспериментов оказалось возможным сделать следующие выводы. Первый — о целесообразности применения бесконечных моделей дефектных тел: такие задачи при определенных постановках могут быть решены либо точно, либо полу-аналитически. Если высота цилиндра сравнима с его утроенным диаметром, уже можно рассматривать тело как неограниченное. Далее, выполненные сравнения с эталонными задачами дают возможность заключить, что относительная ошибка расчетов по программе настоящей работы не превышает 2 % — это не окончательный вывод, его нельзя сделать, опираясь на частный результат, это лишь некоторое указание.

Обратимся к рис. 3 и 4, на которых соответственно изображены графики функций $H_{\rho}(\varphi, z)$ и $H_z(\varphi, z)$, построенные при $\varphi = \text{const}$ и при условии намагничивания постоянным полем, направленным вдоль оси $0z$: на обоих рисунках непрерывные линии соответствуют цилиндру без дефекта, а точки выставлены по результатам расчета по программе для цилиндра с дефектом. На оси абсцисс синим выделена зона протяженности большого цилиндра, а красным — зона протяженности внутреннего дефекта. Если рис. 4 показывает, как дефект вносит видимые изменения в кривую $H_z(\varphi, z)$, то по рис. 3 обнаружить наличие дефекта непросто. Изменяя значение параметров задачи, можно добиться более явного влияния дефекта на эти и иные зависимости.

Для прояснения приведем аналогичные зависимости для так называемого «поля дефекта», вычисляемого по формуле:

$$\mathbf{H}^{\text{деф}}\left(\mathbf{r}\right)=\mathbf{H}^{\text{цил. с деф.}}\left(\mathbf{r}\right)-\mathbf{H}^{\text{цил. без деф.}}\left(\mathbf{r}\right).$$

На рис. 5 и рис. 6 даны зависимости $H_{\rho}^{\text{деф}}\left(\varphi,z\right)$ и $H_z^{\text{деф}}\left(\varphi,z\right)$, построенные при $\varphi = \text{const}$ и при тех же исходных данных, что и зависимости на двух предыдущих рисунках. Компоненты поля дефекта сохраняют память о том большом цилиндре, в котором находится дефект, она выражается в виде локальных экстремумов в зоне торцов большого цилиндра.

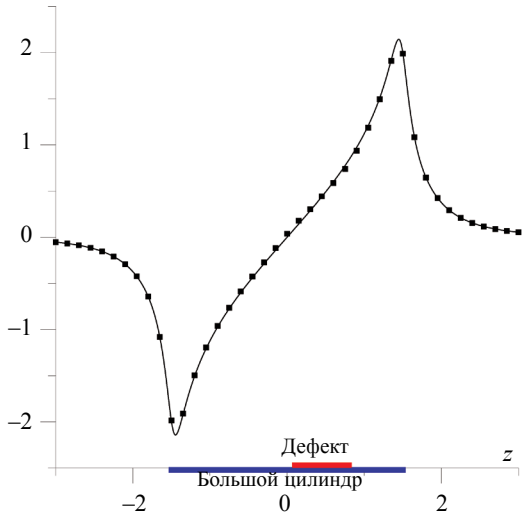

Рис. 3. Зависимость ρ-компоненты результирующего поля от координаты z на расстоянии ρ = 0,6 от оси большого цилиндра при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$. Непрерывная линия — для конечного цилиндра без дефекта, точки — для такого же цилиндра с дефектом. Параметры расчета: μ=100; $\mu_d = 10$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = 0{,}1$; $h_4 = 0{,}8$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0{,}3$.

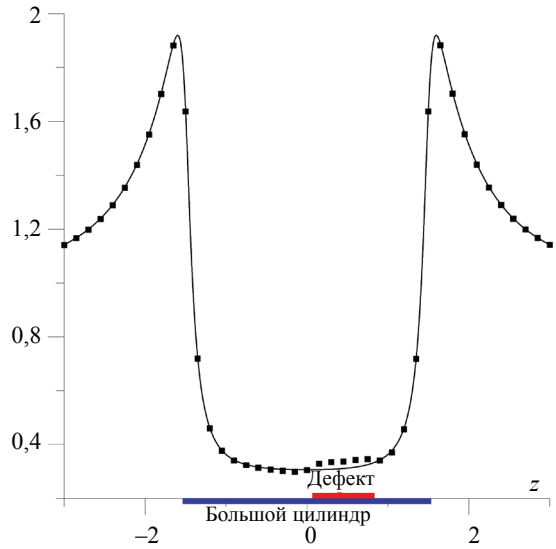

Рис. 4. Зависимость z-компоненты результирующего поля от координаты z на расстоянии ρ = 0,6 от оси большого цилиндра при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$. Непрерывная линия — для конечного цилиндра без дефекта, точки — для такого же цилиндра с дефектом. Параметры расчета: μ=100; $\mu_d = 10$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = 0{,}1$; $h_4 = 0{,}8$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0{,}3$.

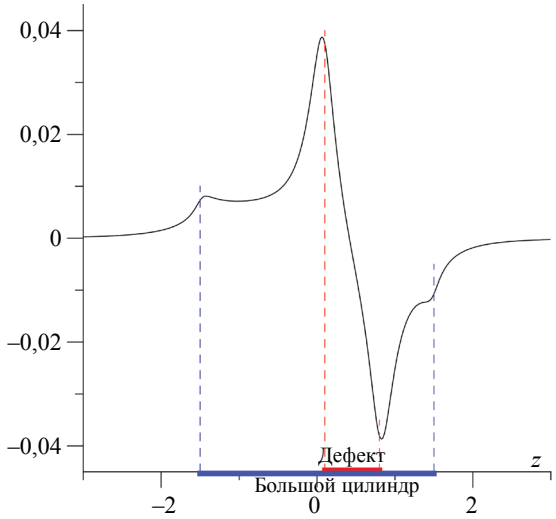

Рис. 5. Зависимость ρ-компоненты поля дефекта от координаты z на расстоянии ρ = 0,6 от оси большого цилиндра при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$; μ = 100; $\mu_d = 10$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = 0{,}1$; $h_4 = 0{,}8$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0{,}3$.

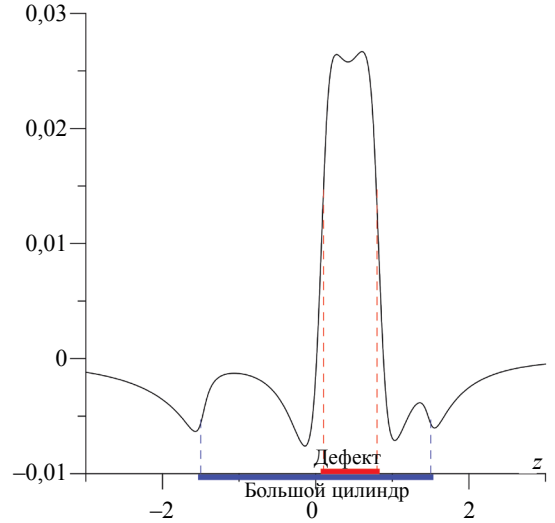

Рис. 6. Зависимость z-компоненты поля дефекта от координаты z на расстоянии ρ = 0,6 от оси большого цилиндра при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$; μ = 100; $\mu_d = 10$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = 0{,}1$; $h_4 = 0{,}8$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0{,}3$.

Для дополнительной проверки качества новой программы был проведен численный эксперимент, по результатам которого можно было наблюдать, как изменяется результирующее поле при «исчезновении» большого цилиндра как магнетика, которое достигалось путем последовательного сведения магнитной проницаемости μ к единице. На рис. 7 и 8 соответственно даны построенные при $\mathbf{H}^0 = \left(0, 0, H^0\right)$ и при φ = const кривые зависимостей $H_\rho(\varphi, z)$ и $H_z(\varphi, z)$ как иллюстрации к данному эксперименту: цветные линии отвечают расчетам по программе «цилиндр с дефектом», а черная линия отвечает расчету по программе «цилиндр без дефекта», выполненному для малого цилиндра. Расхождение между черной и зеленой линиями отражает снижение точности вычислений по новой программе при μ = 1, что подтверждалось и значительным увеличением числа обусловленности матрицы системы линейных алгебраических уравнений. Тем не менее, результат такого предельного перехода можно считать вполне удовлетворительным.

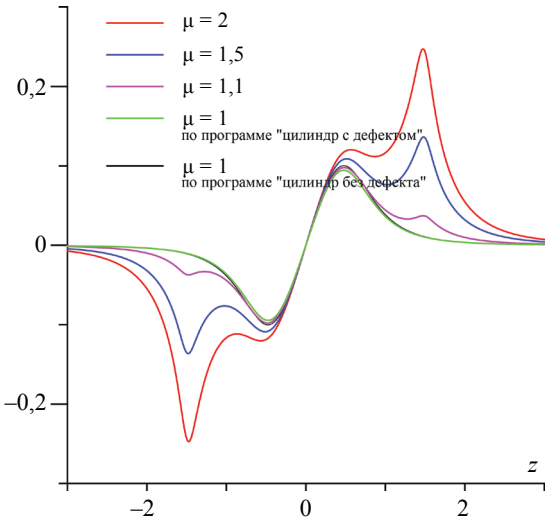

Рис. 7. Зависимость ρ-компоненты результирующего поля от координаты z при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$; $\mu_d = 20$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = -0{,}5$ и $h_4 = 0{,}5$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0$.

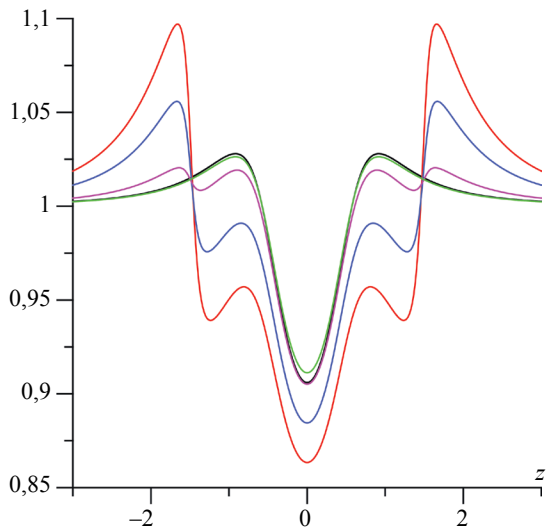

Рис. 8. Зависимость z-компоненты результирующего поля от координаты z при $\mathbf{H}^0 = (0, 0, H^0)$; $\mu_d = 20$; $h_1 = h_2 = 1{,}5$; $h_3 = -0{,}5$ и $h_4 = 0{,}5$; $\rho_0 = 0{,}5$; $\rho_d = 0{,}15$; $x_d = 0$.

По результатам расчетов были построены многочисленные зависимости, отражающие влияние изменений параметров задачи на окончательный результат. Мы не стали помещать в статью, чтобы не увеличивать ее объем. Если у экспериментаторов возникнет потребность качественной сверки модельных экспериментов и результатов расчетов, то мы будем рады такому сотрудничеству.

Очевидна необходимость продолжения работы по применению различных подходов к решению такого рода задач. Таким образом, пополняется библиотека теоретических задач магнитного контроля. Результаты решения любой из таких задач, в частности, представленной в настоящей работе, могут быть использованы для качественного сравнения с результатами модельных экспериментов. Кроме того, на основе решения прямых задач возникает перспектива составления оценочных алгоритмов по определению геометрических форм скрытых дефектов и их численных характеристик.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Электрон».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V.* To the Calculation of the Field of a Finite Magnetic Cylinder // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 10. P. 734—745. [*Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я.* К расчету поля конечного магнитного цилиндра. Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 24—34.]

2. *Хижняк Н.А.* Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1986. 278 с.

3. *Дякин В.В.* Математические основы классической магнитостатики. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2016. 404 с.

4. *Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я.* Один подход к численному решению основного уравнения магнитостатики для конечного цилиндра в произвольном внешнем поле // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 22—34.

5. *Дякин В.В., Раевский В.Я., Кудряшова О.В.* Дефект в шаре // Дефектоскопия. 2009. № 9. С. 16—30.

6. *Михлин С.Г.* Курс математической физики. М.: Наука, 1968. 575 с.

7. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 277с.

8. *Дякин В.В., Кудряшова О.В.* Дефект в цилиндре // Дефектоскопия. 2012. № 4. С. 41—55.

9. *Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я.* Точное решение одной задачи магнитостатики в биполярных координатах (продолжение) // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 48—58.

УДК 620.179.14

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛА ВИБРОИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ НАД ДЕФЕКТНЫМ УЧАСТКОМ

© 2021 г. Ю.Л. Николаев[1,3,*], П.Н. Шкатов[1,3,4,], Э.Ф. Ахметшина[1,***], А.А. Саморуков[2,****]**

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Россия 107996 ЦФО, Москва, ул. Стромынка, 20
[2]Общество с ограниченной ответственностью «ТМС РУС» (ООО «ТМС РУС»), Россия 127083 Москва, ул. Верхняя Масловка, 20, стр. 2
[3]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия 117342 Москва, ул. Бутлерова, 15
[4]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14
*E –mail: *nikolaev_yu@mirea.ru; **petr_shkatov@mail.ru; ***anilea24@gmail.com; ****samorukov.alexey@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.12.2020; после доработки 07.05.2021;
Принято к публикации 17.05.2021

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование выходного сигнала виброиндукционного преобразователя (ВИП), формируемого при воздействии на него нормальной составляющей H_n напряженности магнитного поля рассеяния над дефектом. Теоретическое исследование основано на представлении сигнала ВИП в виде тригонометрического ряда, ограниченного пятью первыми гармониками. В качестве исходной информации для построения математической модели использованы известные закономерности распределения H_n над дефектным участком. На основании полученной математической модели выявлены закономерности изменения гармонического состава сигнала ВИП при его перемещении в зоне дефекта с различной амплитудой и частотой вибрации. Результаты теоретического исследования подтверждены экспериментально. Показаны дополнительные возможности данного способа магнитной дефектоскопии по сравнению с известными.

Ключевые слова: магнитная дефектоскопия, виброиндукционный преобразователь, нормальная составляющая, математическая модель, спектральный анализ.

DOI: 10.31857/S0130308221070034

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность магнитной дефектоскопии конкретных объектов в значительной степени зависит от выбора типа магниточувствительного преобразователя. Особенности выбора магниточувствительного преобразователя с учетом специфики решаемых задач дефектоскопии рассмотрены в работе [1]. Обладая рядом преимуществ, по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, магнитный контроль имеет ограниченные возможности отстройки от влияющих факторов из-за меньшей информативности регистрируемых сигналов, чем, например, при вихретоковом контроле. Вихретоковый сигнал имеет два линейно независимых параметра — амплитуду и фазу, в отличие от сигналов магниточувствительных преобразователей, имеющих в качестве параметра выходного сигнала только амплитуду.

Для повышения достоверности контроля в работе [2] рассмотрен способ, основанный на измерении градиента напряженности магнитного поля с помощью двух дифференциально включенных магнитостатических элементов. Данный способ позволяет ослабить влияние на выходной сигнал мешающих факторов, связанных с наличием фона и магнитной неоднородностью объекта контроля.

В работе [3] показано, что дополнительная информация о параметрах объекта контроля может быть получена путем спектрального анализа сигналов, получаемых при сканировании магниточувствительными преобразователями. Однако для его реализации при традиционном подходе требуется запись регистрируемых сигналов и их постобработка

В работах [4, 5] предложен вариант индукционного метода магнитной дефектоскопии с виброперемещением индуктивной катушки преобразователя. Для краткости такой преобразователь будем в дальнейшем называть виброиндукционным преобразователем (ВИП). Сигнал ВИП

формируется одним чувствительным элементом, пропорционален мгновенной скорости изменения регистрируемой характеристики магнитного поля по координате и является периодической функцией времени. В отличие от известных магнитоизмерительных преобразователей (феррозондового, Холла и др. [6]) сигнал ВИП имеет два информативных параметра — амплитуду и фазу гармоник с частотой, кратной частоте колебаний катушки. При вихретоковых измерениях наличие двух линейно независимых информативных параметров позволяет раздельно измерять два параметра контролируемого объекта при их одновременном изменении или подавлять влияние одного из них, например, рабочего зазора при дефектоскопии. Следует отметить, что информативная составляющая вихретокового сигнала не превышает нескольких процентов от суммарного сигнала. Как следствие — дефекты глубиной до 0,5 мм, как правило, выявляются только на участках с зачищенной поверхностью, не содержащей магнитных неоднородностей [7].

Наиболее ценная дополнительная информация при использовании ВИП определяется присущим только ему характерным изменением спектрального состава выходного сигнала при воздействии магнитных потоков рассеяния дефектов. В отличие от известного способа магнитной дефектоскопии [3] гармонические составляющий ВИП регистрируются непосредственно в процессе контроля. При регистрации нормальной и тангенциальной составляющих магнитных потоков рассеяния гармонический состав выходного сигнала ВИП различен, изменяется и их связь с параметрами дефекта.

Зависимости изменения выходного сигнала различного вида магнитостатических преобразователей при регистрации как тангенциальной H_τ, так и нормальной H_n составляющих напряженности магнитного поля рассеяния достаточно хорошо исследованы [8—11]. Для магнитной дефектоскопии на основе ВИП опубликованы результаты исследований в виде математических моделей и соответствующих зависимостей применительно к тангенциальной составляющей [12, 13]. Показано, что при виброперемещении над центром трещины возникает периодический сигнал удвоенной частоты по сравнению с частотой виброперемещения с доминированием 2-ой гаромоники. Выполненные экспериментальные исследования ВИП сигналов от обеих составляющих и сигналов, получаемых с помощью дифференциально включенных датчиков Холла, с точки зрения отношения полезного сигнала к фоновой составляющей при полюсном намагничивании изложены в [14]. В данной публикации показано, что отношение «полезный сигнал/фон» при регистрации магнитных полей дефектов посредством ВИП по обеим составляющим превышает соответствующее значение при регистрации дифференциальным преобразователеми Холла более, чем в 5 раз.

В настоящей работе изложены исследования, направленные на математическое описание и анализ закономерностей изменения выходного сигнала ВИП под воздействием нормальной составляющей H_n напряженности магнитного поля.

Преимущество поиска дефектов путем регистрации H_n связано с тем, что эта составляющая ортогональна силовым линиям поля намагничивания. Благодаря этому H_n близка к нулю в зоне магнитной нейтрали намагничивающей системы. Кроме того, при регистрации H_n активная площадь магниточувствительного преобразователя параллельна поверхности контролируемого объекта и находится в зоне с большей индукцией магнитных потоков рассеяния по сравнению с регистрацией тангенциально ориентированным ВИП. Также, очевидно, что расположение плоскости катушки параллельно поверхности приводит к усреднению ложных сигналов от микронеровностей. К недостаткам дефектоскопии путем измерения H_n относятся ограничения, связанные с контролем сложнопрофильных участков, например, резьбовых соединений, канавок, галтельных переходов. Для подобных объектов при реализации измерений по тангенциальной составляющей профиль витков катушки может быть согласован с профилем поверхности с вибрацией катушки вдоль образующей.

Отмеченные преимущества регистрации по H_n предполагают возможность эффективного использования нормально ориентированного ВИП при ручном контроле объектов с поверхностью малой кривизны.

Схема контроля посредством ВИП, ориентированным на регистрацию H_n, показана на рис. 1.

Участок объекта контроля *2* с поверхностной трещиной *3* намагничивается постоянным магнитным полем с индукцией B, предположительно ориентированным перпендикулярно к трещине. В результате над дефектом возникает локально распределенное магнитное поле дефекта (жирная линия) и фоновое магнитное поле (штриховая линия).

В процессе сканирования поверхности объекта контроля индуктивная катушка *1* преобразователя совершает колебания по гармоническому закону. Передача колебательного движения катушки осуществляется от пьезоэлектрического или электродинамического привода посредством маятни-

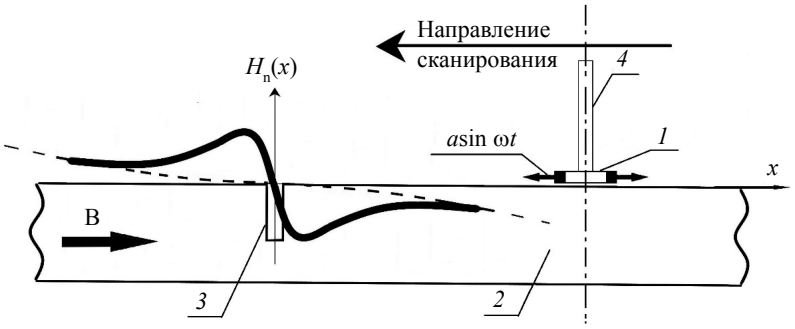

Рис. 1. Схема контроля с ВИП, регистрирующим нормальную составляющую $H_n(x)$:
1 — индуктивная катушка; *2* — объект контроля; *3* — поверхностный дефект; *4* — маятниковый элемент для передачи вибрации на катушку.

кового переходного элемента *4*. Конструкция ВИП с пьезоэлектрическим приводом обеспечивает амплитуду колебаний до 0,5 мм на частотах порядка 500 Гц и до 2,0 мм на частотах порядка 250 Гц. Амплитуда виброперемещения катушки ВИП с электродинамическим приводом регулируется в диапазоне до 2,0 — 5,0 мм на частотах порядка 200 и 150 Гц соответственно.

При любом статическом положении корпуса ВИП и объекта контроля выходной сигнал катушки является периодической функцией времени, амплитудный спектр которой содержит гармоники, характерные для распределения напряженности магнитного поля в пределах диапазона виброперемещения катушки. В зоне дефекта на ВИП воздействуют локально распределенное магнитного поле дефекта и фоновое магнитное поле, имеющие существенное различие в законах распределения. В результате измерения амплитудных значений спектральных гармоник и их анализа представляется возможным выявить распределения, обусловленные наличием дефекта.

Анализ сигнала ВИП при воздействии нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния над дефектным участком проводился путем математического моделирования и экспериментально.

Фото экспериментальной установки показано на рис. 2. Она содержит систему *1* намагничивания от магнитного дефектоскопа МД-6 с напряженностью намагничивающего поля порядка 800 А/см на поверхности полюсных наконечников, координатный стол *2*, контрольный образец из стали Ст3

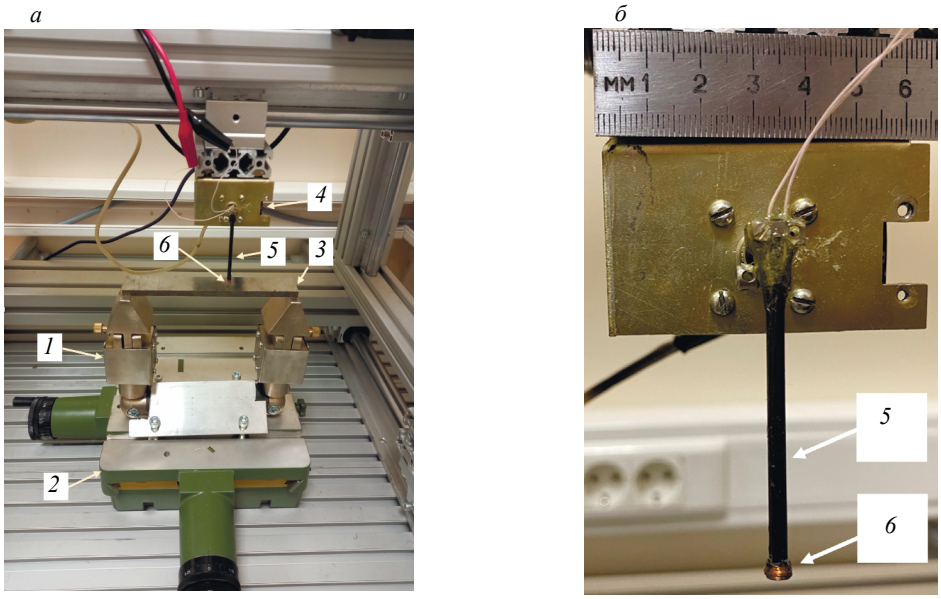

Рис. 2. Экспериментальная установка:
а — общий вид, *б* — ВИП.
Данная установка применялась также для прямого измерения распределения напряженности нормальной составляющей $H_n(x)$ с помощью миллитесламетра ТПУ-01.

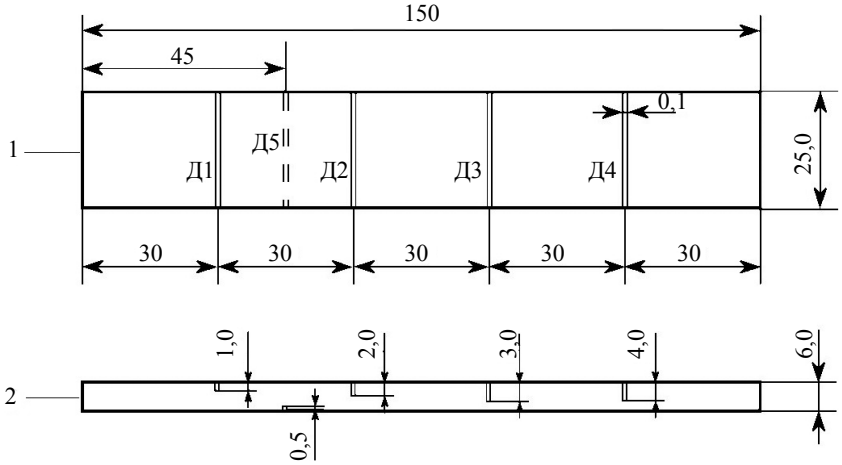

Рис. 3. Эскиз контрольного образца с искусственными дефектами.

с искусственными дефектами (рис. 3) и ВИП, состоящий из привода *4*, маятникового стержня *5* длиной 60 мм, индуктивной катушки *6*. На рис. 2*б* стержень с катушкой показаны отдельно.

Обмотка индуктивной катушки выполнена на каркасе диаметром 4 мм проводом диаметром 0,06 мм. Наружный диаметр катушки 4,6—4,8 мм. Электрическое сопротивление катушки 13—13,5 Ом, индуктивность — 50—55 мкГн.

Данная установка применялась также для прямого измерения распределения напряженности нормальной составляющей $H_{\text{n}}(x)$ с помощью миллитесламетра ТПУ-01.

Математическое моделирование выходного сигнала ВИП основано на преобразовании выражения для ЭДС индукции, наводимой в катушке при ее виброперемещении в зоне магнитного поля дефекта, в тригонометрический ряд.

Наводимая в катушке ЭДС $e(t)$ при ее перемещении пропорциональна изменению усредненной в охватываемой ее витками зоне соответствующей составляющей напряженности магнитного поля, в данном случае — нормальной составляющей H_{n}. При этом, как показали результаты экспериментов, при уменьшении диаметра катушек, начиная с 5 мм, характер зависимостей практически не изменяется. В связи с этим целесообразно оперировать усредненной величиной H_{n}, сохраняя общность получаемых результатов и избегая неоправданного усложнения модели.

Таким образом, при перемещении и вибрации ВИП вдоль контролируемой поверхности параллельно силовым линиям намагничивающего поля представим в виде $e(t)$:

$$e(t) = -k \cdot \left.\frac{dH_{\text{n}}(x)}{dx}\right|_{x=x(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \tag{1}$$

где $H_{\text{n}}(x)$ — функция, описывающая распределение усредненной по сечению катушки напряженности H_{n} вдоль линии перемещения, задаваемой осью координат x с началом отсчета в центре магнитного поля дефекта (см. рис. 1); t — время; $x(t)$ — уравнение перемещения; k — коэффициент, зависящий от магнитных свойств материала контролируемого объекта и среды контроля, числа витков и площади сечения катушки, а также неравномерности распределения H_{n} в ее объеме.

При моногармоническом законе колебаний катушки в точке $x = x_0$:

$$x(t) = x_0 + a\sin \omega t, \tag{2}$$

где a и ω — амплитуда и частота колебаний катушки соответственно.

В качестве исходной информации для построения математической модели выходного сигнала ВИП служит распределение H_{n} над дефектным участком. Функция распределения $H_{\text{n}}(x)$ может быть представлена в виде суммы распределений напряженностей магнитного поля рассеяния от дефекта $H_{\text{д}}(x)$ и фона $H_{\text{ф}}(x)$. Это иллюстрируется экспериментально полученными на описанной экспериментальной установке распределениями $H_{\text{ф}}(x)$ и $H_{\text{n}}(x) = H_{\text{д}}(x) + H_{\text{ф}}(x)$, представленными на рис. 4, где x' — координаты точек поверхности образца.

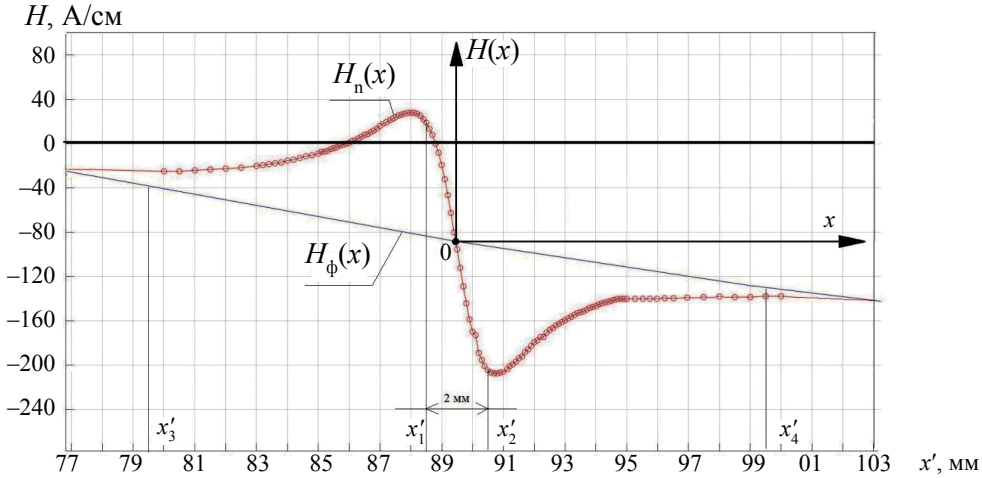

Рис. 4. Зависимости $H_{\text{п}}(x)$ и $H_{\text{ф}}(x)$ над образцом с дефектом глубиной h =3,0 мм, шириной b = 0,1 мм в точке x' = 90 мм.

Аппроксимация функций, имеющих такую же форму, как $H_{\text{д}}(x)$, часто встречается в различных приложениях [15]. Анализ показал, что целесообразно выбрать аппроксимацию в виде знакочередующегося степенного многочлена, содержащего только нечетные степени переменной x:

$$H_{\text{д}}(x) = \sum_{n=1}^{m} (-1)^n \cdot \beta_i \cdot x^{(2n-1)}. \tag{3}$$

Установлено, что высокая точность приближения (3) к эмпирическим распределениям достигается при $n > 4$, что соответствует многочлену 9-го порядка и выше. Вместе с тем для качественного анализа достаточно воспользоваться многочленом 5-го порядка, отвечающего свойствами нечетности, двухмодальности, а также условию наличия 3-х точек перегиба эмпирических распределений:

$$\begin{cases} H_{\text{д}}(x) = -\beta_1 x + \beta_2 x^3 - \beta_3 x^5, & \text{при} \left|x\right| \le \gamma \\ H_{\text{д}}(x) = 0, & \text{при} \left|x\right| \succ \gamma \end{cases}, \tag{4}$$

где $\boldsymbol{\gamma}$ — граница магнитного поля рассеянии дефекта.

Коэффициенты β_i уравнения (4) определяются на основе измерения координат и значений напряженности в характерных точках экспериментально полученного распределения нормальной составляющей магнитного дефекта. Коэффициент β_1 численно равен разности тангенсов угла наклона графиков суммарного распределения $H_{\text{п}}(x)$ и фона $H_{\text{ф}}(x)$, определяемых на линейных участках x_1', x_2' и x_3', x_4' (см. рис. 4) соответственно. Коэффициенты β_2 и β_3 определяются из условия равенства значений напряженности в точках экстремума эмпирического распределения и его модели. В частности, для представленного на рис. 4 экспериментально полученного распределения $H_{\text{п}}(x)$ над дефектом глубиной 3 мм и шириной 0,1 мм в точке x' = 90 мм (см. рис. 3) уравнение (4) имеет вид: $H_{\text{д}}(x) = -120{,}7x + 20x^3 - 0{,}9x^5$. Удовлетворительная сходимость имеет место в пределах ± 3 мм от центра. Для расширения интервала сходимости необходима модель более высокого порядка, коэффициенты которой определяются по координатам и значениям напряженности в точках перегиба и на границах распределения.

Подстановка (2) и (4) в (1) дает выражение для информативной составляющей $e_{\text{д}}(t)$ выходного сигнала ВИП в форме тригонометрического ряда:

$$e_{\text{д}}(t) = E_{1m}\cos\omega_0 t + E_{2m}\sin 2\omega_0 t + E_{3m}\cos 3\omega_0 t + E_{4m}\sin 4\omega_0 t + E_{5m}\cos 5\omega_0 t, \tag{5}$$

где E_{im} — амплитудные значения гармонических составляющих:

$$
\begin{aligned}
E_{1m} &= a\left[\beta_1 - 3\beta_2 x_0^2 - 0,75\beta_2 a^2 + 5\beta_3 x_0^4 + 7,5\beta_3 x_0^2 a^2 + 0,63\beta_3 a^4\right]k\omega_0,\\
E_{2m} &= x_0 a^2\left[-3\beta_2 + 10\beta_3 x_0^2 + 5\beta_3 a^2\right]k\omega_0,\\
E_{3m} &= a^3\left[0,75\beta_2 - 7,5\beta_3 x_0^2 - 0,94\beta_3 a^2\right]k\omega_0,\\
E_{4m} &= x_0 a^4\left(-2,5\beta_3\right)k\omega_0,\\
E_{5m} &= a^5 \cdot 0,31\beta_3 \cdot k\omega_0.
\end{aligned}
\tag{6}
$$

Анализ зависимостей (6) показывает, что при входе катушки ВИП в зону магнитного поля дефекта формируется полигармонический выходной сигнал, содержащий от 3 ($a \le 3$ мм) до 5 ($a > 3$ мм) значимых гармоник. При колебаниях ВИП вблизи центра магнитного поля дефекта амплитуды E_{1m} и E_{3m} возрастают, достигая над дефектом ($x_0 = 0$) наибольших значений. Амплитуды E_{2m} и E_{4m} убывают, принимая в точке $x_0 = 0$ нулевые значения.

На рис. 5 показаны экспериментальные графики изменения ЭДС $E_i(x)$ (i = 1, 2, 3) первых трех гармоник, измеренной в действующих значениях, при перемещении ВИП вдоль оси x в пределах ± 5 мм от центра дефекта глубиной 3 мм при a = 3 мм. Максимумы E_i нечетных гармоник и пикового значения выходного сигнала наблюдаются в пределах ±0,5 мм относительно центра дефекта. В этих же пределах 2-я гармоника, как и 4-я, обращаются в ноль, изменяя фазу на 180°. С увеличением амплитуды a колебаний значение амплитуды 1-й и 3-й гармоник возрастают, причем по 3-й гармонике — с большей интенсивностью. Однако с увеличением а свыше 3 мм графики $E_i(x)$ этих гармоник становятся более плоскими и протяженными. При a = 6 мм границы плоского участка по 1-й гармонике составляют ± 2 мм. Поэтому центр магнитного поля дефекта целесообразно определять по нулевому значению амплитуды 2-й гармоники. В этом случае погрешность определения центра не превышает десятых долей мм.

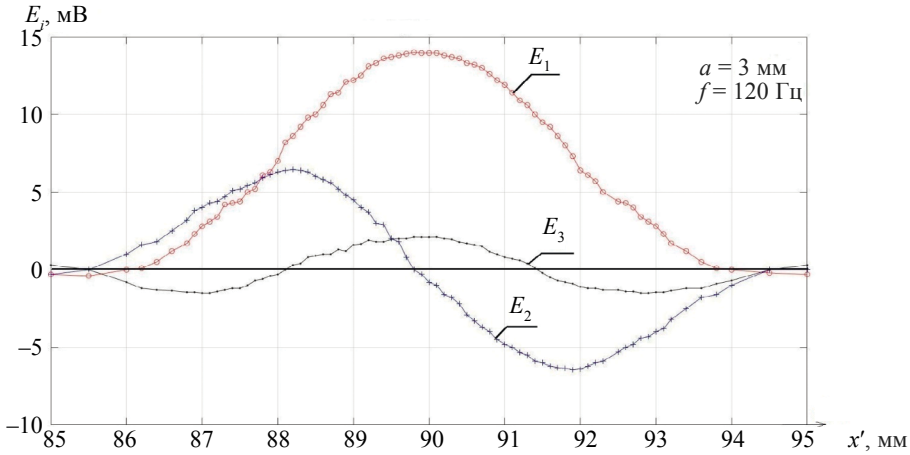

Рис. 5. Экспериментальные зависимости E_i гармоник вносимой ЭДС при перемещении ВИП над дефектным участком: глубина дефекта h = 3 мм, ширина b = 0,1 мм, координата x' = 90 мм.

Таким образом, наличие дефекта и его координата определяются по максимумам амплитуд E_{1m}, E_{3m} и минимуму амплитуды четных гармоник.

Распределение нормальной составляющей фонового поля $H_ф(x)$ моделируется на интервале $[x - a, x + a]$ линейной функцией:

$$e_ф(t) = b_ф x + c,$$

где $b_ф < 0$ — тангенс угла наклона $H_ф(x)$ на заданном интервале.

В этом случае на основании (1) и (2) фоновая составляющая выходного сигнала в ВИП $e_ф(t)$ представляет собой гармонику с частотой колебаний катушки, амплитуда которой пропорциональна в $b_ф$:

$$e_{ф}(t) = -kb_{ф} \cdot a\omega \cdot \cos\omega t = E_{фm} \cos\omega t,$$

где $E_{фm}$ — амплитудное значение.

Фоновая гармоника $e_{ф}(t)$ и 1-я гармоника информативного сигнала $e_{1д}(t)$ (5) совпадают по фазе, поэтому выходной сигнал ВИП включает сумму этих гармоник.

Из анализа выражений, описывающих выходной сигнал ВИП при воздействии на него нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния над дефектом, следует, что с увеличением частоты колебаний амплитуды гармоник ряда (5) $E_{фm}$ линейно возрастают.

С увеличением амплитуды виброперемещения a увеличение амплитудных значений $E_{фm}$ носит более сложный характер. При амплитуде колебаний $a \leq 0{,}2\gamma$ значимы первые три гармоники. Максимум E_{1m} в точке $x_0 = 0$ превышает максимум E_{3m} в той же точке более чем на порядок и в несколько раз — максимумы E_{2m}, расположенные вблизи точек экстремумов распределения напряженности $H_{п}(x)$. С увеличением a в точке $x_0 = 0$ свыше $0{,}25\gamma$ амплитуда E_{3m} интенсивно нарастает, в то время как приращение амплитуды E_{1m} начинает убывать. В результате амплитуда E_{1m} и E_{3m} становятся соизмеримы.

Сделанные выводы подтверждаются полученными по экспериментальным данным зависимостям, представленным на рис. 6.

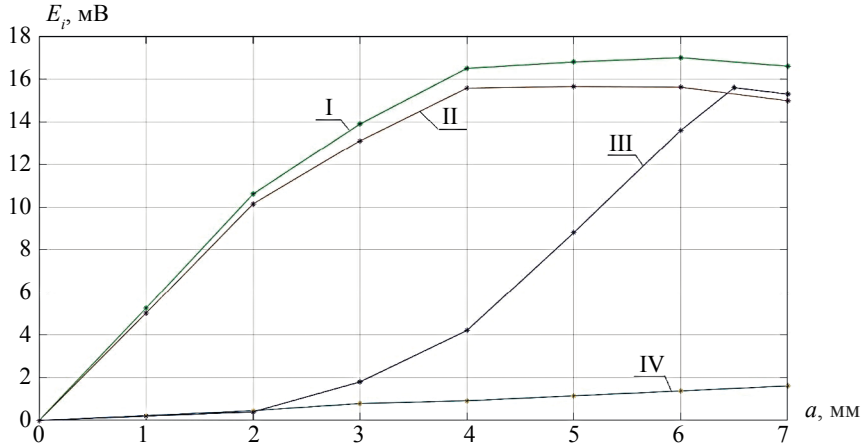

Рис. 6. Зависимости действующих значений гармоник ЭДС от амплитуды колебаний:
I – $E_1 = E_1(a)$ — 1-я гармоника выходного сигнала; II – вносимая дефектом информативная составляющая 1-й гармоники $E_{1вн}(a) = E_1(a) - E_{ф}(a)$; III — $E_3 = E_3(a)$ — 3-я гармоника; IV — $E_{1ф}(a)$ — фоновая составляющая 1-й гармоники.

Так как 1-я и 3-я гармоники ряда (5) совпадают по фазе, пиковые значения суммарного сигнала равны сумме E_1 и E_3, что подтверждается показанными на рис. 7, 8 спектрограммой и осциллограммой выходного сигнала при $a = 6$ мм. Следовательно, при регистрации дефектов по пиковому значению выходного сигнала ВИП отношение сигнал/фон и пороговая чувствительность к дефектам повышаются.

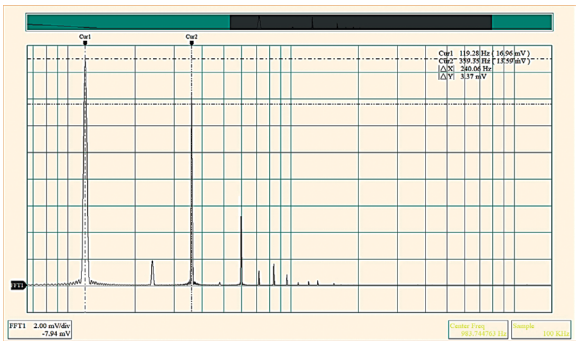

Рис. 7. Спектрограмма выходного сигнала при амплитуде колебаний $a = 6$ мм.

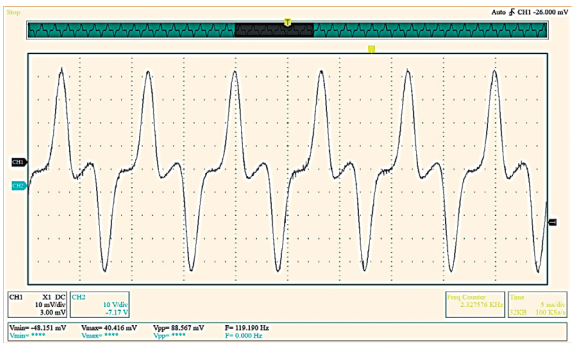

Рис. 8. Осциллограмма выходного сигнала при амплитуде колебаний $a = 6$ мм.

Для ВИП с вышеописанными параметрами величина предельного рабочего зазора $Z_р$ определялась экспериментально на образце, представленном на рис. 3. Предельным принималась величина $Z_р$, при которой полезный сигнал превышал среднеквадратическое значение фона и стохастически распределенного шума в 2 раза. Поверхностные дефекты $Д_1$ и $Д_4$, в виде прямоугольных прорезей $Д_1$ — 1,0 × 0,1 мм и $Д_2$ — 4,0 × 0,1 мм, выявлялись при рабочем зазоре до 4,0 и 8,0 мм соответственно. Дефект $Д_5$ в виде прямоугольной прорези 0,5 × 0,1 мм, расположенный на тыльной поверхности образца, выявлялся при рабочем зазоре до 2,0 мм.

Проверка чувствительности ВИП к дефектам малых размеров выполнялась на аттестованных образцах дефектов для магнитопорошкового контроля. Для дефекта шириной 3,5 мкм и глубиной 0,2 мм при амплитуде колебаний катушки 2 мм на частоте 200 Гц пиковое значение выходного сигнала ВИП составило порядка 2,5 мВ при рабочем зазоре $Z_р$ = 0,5 мм, что превышает уровень фона и шума более чем в 5 раз. Данный результат свидетельствует о более высокой чувствительности ВИП к дефектам малых размеров по сравнению с вихретоковыми преобразователями при сопоставимых условиях измерения [7].

Преимуществом нормально ориентированного ВИП по сравнению с тангенциально ориентированным, идентичным по параметрам катушки, и прочих равных условиях контроля является более высокий уровень выходных сигналов и пороговой чувствительности. При регистрации дефекта $Д_3$ в диапазоне амплитуды виброперемещения a = 1—5 мм уровень выходного сигнала по пиковому значению составил 5,2—25 мВ, а по амплитуде информативной составляющей 1-й гармоники — 5—15,5 мВ, что превышает уровни выходного сигнала тангенциально ориентированного ВИП в 1,5 и 2 раза соответственно. При этом измеренное среднеквадратическое значение шума в обоих случаях не превышало 0,15 мВ. С точки зрения информативности контроля различие заключается в разных признаках определения местоположения дефекта — по четным гармоникам для тангенциально ориентированного ВИП и по нечетным для нормально ориентированного. Исходя из этого, вибрационные способы регистрации магнитных полей дефектов могут дополнять друг друга.

Использованные в исследованиях экспериментальные образцы ВИП представляют собой конструкции с габаритными размерами приводного узла электромагнитного ВИП, составляющими 30×55×70 мм, и пьезоэлектрического Ø35×40 мм при длине маятниковой части 60—70 мм. Однако имеется возможность дальнейшей оптимизация конструкции, связанная с уменьшением габаритных размеров приводных узлов.

ВЫВОДЫ

1. Выходной сигнал ВИП, обусловленный нормальной составляющей магнитных потоков рассеяния дефекта типа трещины, с приемлемой для практики погрешностью описывается математической моделью в виде тригонометрического ряда, включающего первые 5 гармоник с круговой частотой 1-й гармоники ω_0, равной частоте вибрации ВИП.

2. Установлено, что при размещении ВИП в пределах ±0,5 мм относительно центра дефекта амплитуды нечетных гармоник E_1 и E_3 достигают максимума, а амплитуды четных — E_2 и E_4 принимают нулевые значения. Пиковые значения выходного сигнала являются суммой амплитудных значений нечетных гармоник.

3. С увеличением амплитуды a колебаний амплитуды 1-й и 3-й гармоник возрастают, причем по 3-й гармонике — с большей интенсивностью. Однако с увеличением а свыше 3 мм пространственное распределение гармоник становятся более плоскими и вытянутым вдоль линии сканирования. Например, при увеличении от 3 до 6 мм границы плоского участка по 1-й гармонике возрастают от ± 0,5 до ± 2 мм.

4. В реальных условиях контроля наиболее просто выявлять дефекты по превышению пикового значения выходного сигнала ВИП установленного порогового уровня, отсекающего фоновый и шумовой сигналы, а также незначительные по уровню сигналы, возникающие при входе катушки в зону дефекта.

5. Амплитуда 2-й гармоники сигнала ВИП принимает нулевое значение строго под центром дефекта независимо от амплитуды вибрации, что удобно использовать для определения положения дефекта.

6. Экспериментально установлено, что поверхностные дефекты, в виде прямоугольных прорезей с размерами 1,0 × 0,1 мм и 4,0 × 0,1 мм, выявлялись при рабочем зазоре до 4,0 и 8,0 мм соответственно. Дефект в виде прямоугольной прорези 0,5 × 0,1 мм, расположенный на тыльной поверхности образца, выявлялся при рабочем зазоре до 2,0 мм.

7. Проверка чувствительности ВИП к дефектам малых размеров выполнялась на аттестованных образцах дефектов для магнитопорошкового контроля. Для дефекта шириной 3,5 мкм и глубиной 0,2 мм при амплитуде колебаний катушки 2 мм на частоте 200 Гц пиковое значение выходного сигнала ВИП составило порядка 2,5 мВ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны системы мотивирующих выплат и оценки эффективности профессорско-преподавательского состава «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Реутов Ю.Я., Щербинин В.Е., Волков А.В.* Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 71—85.

2. Dehui W., Lingxin S., Xiaohong W., Zhitian L. A Novel Non-destructive Testing Method by Measuring the Change Rate of Magnetic Flux Leakage // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. V. 36. Is. 2. № 24.

3. *Пашагин А.И., Бенклевская Н.П., Щербинин В.Е.* Использование гармонического анализа сигнала индукционного преобразователя для повышения информативности контроля // Дефектоскопия. 2005. № 11. С. 15—19.

4. *Шкатов П.Н., Николаев Ю.Л., Чернова А.В., Юрченко П.В., Кузнецова Г.В.* Индукционный преобразователь / Патент РФ № 2600517. Бюл. изобр. 2016. № 30.

5. *Шкатов П.Н., Николаев Ю.Л., Чернова А.В., Юрченко П.В.* Способ магнитной дефектоскопии / Патент РФ № 2566418. Бюл. изобр. 2015. № 30.

6. *Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитный контроль / Учеб. пособие. Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 192 с.

7. *Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г.* Вихретоковый контроль / РОНКД. Москва, 2014. Сер. Диагностика безопасности (2-е издание). 224 с.

8. Shi Y., Zhang C., Li R., Cai M., Jia G. Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection // Sensors (Basel). 2015. V. 15 (12). P. 31036—31055.

9. Azad A., Kim N. Design and Optimization of an MFL Coil Sensor Apparatus Based on Numerical Survey // Sensors (Basel). 2019. V. 19 (22) P. 4869.

10. Wu J., Fang H., Huang X., Xia H., Kang Y., Tang C. An Online MFL Sensing Method for Steel Pipe Based on the Magnetic Guiding Effect // Sensors (Basel). 2017. V. 17 (12). P. 2911.

11. Anyaoha Peng U., Liu Z., Tsukada K. Analysis of Magnetic-Flux Leakage (MFL) Data for Pipeline Corrosion Assessment // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. V. 56. Is. 6. P. 1—15. Art no. 6200315.

12. *Николаев Ю.Л., Шкатов П.Н., Чернова А.В.* Исследование сигнала от тангенциальной составляющей магнитных потоков рассеяния поверхностного дефекта при его регистрации виброиндукционным преобразователем // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 50—54.

13. *Николаев Ю.Л., Шкатов П.Н., Чернова А.В., Саморуков А.А.* Моделирование и гармонический анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при его перемещении над намагниченным участком с поверхностной трещиной // Приборы. 2019. № 4 (226). С. 17—25.

14. *Николаев Ю.Л., Ахметшина Э.Ф., Саморуков А.А., Чернова А.В.* Оценка соотношения информативного и фонового сигналов при регистрации магнитных полей поверхностных дефектов магнитоизмерительнымы преобразователями // Измерительная техника. 2020. № 5. С. 43—49.

15. *Исаков В.Н., Тимошенко П.И.* Локальная интерполяция и аппроксимация в задачах эвристического синтеза цифровых фильтров // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 4. С.42—64.

УДК 620.179.147:620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

© 2021 г. А.В. Гончар[1,*], В.А. Клюшников[1,], В.В. Мишакин[1,***], М.С. Аносов[2,****]**

[1]Институт проблем машиностроения РАН филиал ФГБНУ «ФИЦ ИПФ РАН», Россия 603024 Нижний Новгород, ул. Белинского, 85
[2]НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
E-mail: [*]avg-ndt@mail.ru; [**]slavchuk2@yandex.ru; [***]imndt31@mts-nn.ru; [****]anosov-maksim@list.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021; после доработки 10.06.2021;
Принято к публикации 11.06.2021

Проведены исследования процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали ультразвуковым и вихретоковым видами контроля. Исследовано развитие неоднородности распределения параметра акустической анизотропии в зоне термического влияния и в основном материале. В результате вихретокового контроля показано различие в интенсивности изменения фазового состава в зоне термического влияния и в основном материале. Получена линейная зависимость между амплитудой деформации цикла при регулярном режиме нагружения в области малоцикловой усталости и критическим значением процентного содержания магнитной фазы в основном материале. Предложен способ оценки усталостной поврежденности материала сварных соединений в зоне термического влияния по результатам вихретокового контроля.

Ключевые слова: сварное соединение, нержавеющая сталь, ультразвуковой контроль, вихретоковый контроль, циклическое деформирование.

DOI: 10.31857/S0130308221070046

ВВЕДЕНИЕ

Нержавеющая аустенитная сталь типа AISI 321 нашла широкое применение в различных промышленных областях, таких как судостроение, ядерная и химическая промышленность. Основные области применения этой стали связаны с ее высокими прочностными свойствами, а также хорошей свариваемостью. При изготовлении сварного соединения образуются зоны термического влияния (ЗТВ), структура которых существенно отличается от структуры основного материала (ОМ). В ЗТВ наблюдается неоднородность фазового состава, градиент физических и механических свойств, реализуется сложное напряженно-деформированное состояние [1]. Отметим также, что, в отличие от низкоуглеродистых сталей, сварное соединение из стали AISI 321 может менять магнитные свойства как в процессе силового [2—6], так и теплового воздействия [7—9]. Как правило, ЗТВ является наиболее слабой зоной в сварном соединении, где, зачастую, и происходит разрушение конструкции. В связи с этим анализ состояния материала необходимо проводить не только в основном материале, но и в ЗТВ сварного соединения.

Для анализа состояния материала в объеме удобным и эффективным является акустический эхометод благодаря его большой проникающей способности, безопасности и возможности контроля при одностороннем доступе к изделию [10].

Оценку изменения магнитных свойств, связанного с фазовыми превращениями в сталях аустенитного класса, как правило, проводят с использованием вихретокового неразрушающего контроля [11—13]. Следует отметить, что на результаты вихретокового контроля могут оказать влияние различные внешние факторы. Более того, на реальном объекте структура ЗТВ будет зависеть от специфики изготовления сварного шва (скорость сварки, температура, используемые электроды, скорость остывания, толщина пластин и др.). Учет влияния этих факторов особенно актуален для нержавеющих сталей аустенитного класса. В работе [14] исследовалось влияние режимов сварки на градиент температуры вдоль и поперек сварного шва, а также на микроструктуру и свойства ЗТВ нержавеющей стали аустенитного класса 12Х18Н10Т. Из-за влияния внешних факторов при изготовлении сварного шва в ЗТВ хромоникелевых сталей может содержаться различное количество магнитной фазы. Объемная доля этой фазы влияет на магнитные [15, 16] и электрические [17] свойства нержавеющей стали аустенитного класса и, как следствие, на показания вихретокового прибора. Это порождает неопределенность начального состояния материала сварных соединений промышленных объектов, находящихся в эксплуатации. Однако для уменьшения вероятности образования горячих трещин и межкристаллитной коррозии свар-

ку аустенитных сталей проводят с подогревом, а остаточные сварочные напряжения снимают термообработкой [18, 19]. Эти операции могут уменьшить содержание магнитной фазы и нивелировать неопределенность начального структурного состояния. Отсутствие информации о начальном состоянии материала является существенным ограничением применения большинства структурно-чувствительных методов неразрушающего контроля при оценке поврежденности материала.

Неоднородность структурного состояния в ЗТВ приводит к неравномерному распределению акустических характеристик и магнитных свойств материала сварного соединения [20, 21]. Показано, что при одноосном растяжении сварного соединения из стали аустенитного класса интенсивность изменения акустических параметров и электромагнитных свойств в ЗТВ и основном материале различна.

Усталость, в отличие от пластического деформирования, является более частой причиной разрушения конструкций. В работах, посвященных исследованию процесса усталостного разрушения сталей аустенитного класса, показано, что амплитуда деформации цикла влияет на интенсивность изменения упругих и акустических характеристик, а так же фазового состава. Совместное применение ультразвукового и вихретокового контроля [22] дает более полную картину о состоянии материала, что можно использовать для предсказания момента разрушения [23]. Задача прогнозирования усталостного разрушения сварного соединения из стали аустенитного класса является более сложной задачей.

В настоящей работе ультразвуковым и вихретоковым видами контроля исследован процесс усталостного разрушения сварных соединений, изготовленных из нержавеющей стали AISI 321. На основе полученных закономерностей изменения характеристических параметров в ЗТВ и основном материале предложен способ оценки усталостной поврежденности сварного соединения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Исследуемый материал и образцы

Для исследования процесса усталостного разрушения сварных соединений были изготовлены образцы круглого сечения из нержавеющей стали аустенитного класса AISI 321.

Для изготовления сварных образцов заготовки были разделены пополам. Двусторонний стыковой шов с двумя симметричными скосами кромок выполняли ручной аргонно-дуговой сваркой.

Химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали AISI 321, %

C	Cr	Ni	Ti	Si	Mn	P	S	Mo	Co	W	Cu	Fe
0,08	18,6	10,8	0,6	0,48	0,69	0,028	0,017	0,23	0,06	0,13	0,29	Основа

Рабочая часть образцов составляла 28 мм, диаметр рабочего сечения — 8 мм. На рабочей части каждого образца были вырезаны две плоско-параллельные площадки для проведения ультразвукового и вихретокового контроля. Поверхность в рабочей части разделялась на 6 зон (по три зоны слева и справа от СШ), ширина каждой составляла 4 мм (рис. 1). Ультразвуковой и вихретоковый контроль проводили в каждой зоне. Для повышении точности позиционирования датчиков были нанесены метки перманентным маркером.

Анализ микроструктуры в основном материале и в зоне термического влияния осуществляли металлографическим методом с использованием оптического микроскопа Альтами МЕТ 3М. Изготавливали микрошлифы, выполняли электролитическое травление с использованием 10 % водного раствора щавелевой кислоты при напряжении 1 В и комнатной температуре.

Циклическое деформирование проводили на универсальной машине BISS Nano в области малоцикловой усталости. Образцы подвергались одноосному растяжению-сжатию (коэффициент симметрии $R = -1$) с амплитудой деформации цикла ε_a (0,3, 0,4 и 0,5 %) с частотой 2 Гц. Каждый образец нагружали поэтапно. Ультразвуковой и вихретоковый контроль совершали до испытания и после каждого этапа циклического деформирования, вплоть до образования макротрещины.

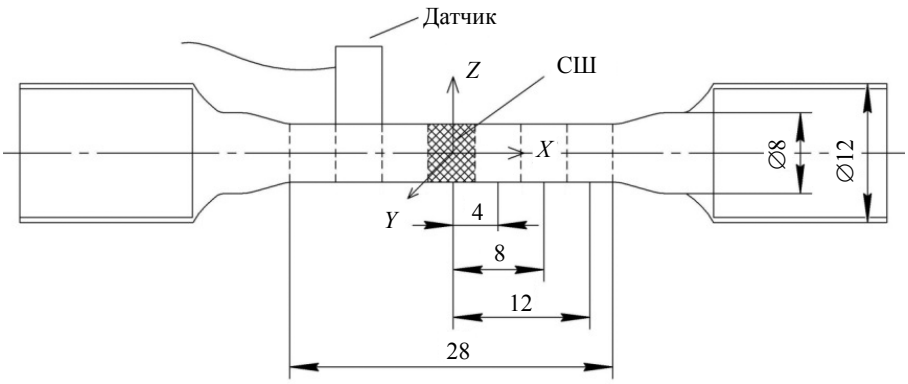

Рис. 1. Схема установки датчиков на образец, размеры в мм.

Б. Ультразвуковой контроль

Акустические исследования материала проводили ультразвуковым эхометодом. На рис. 2*а* представлена блок-схема экспериментальной акустической установки.

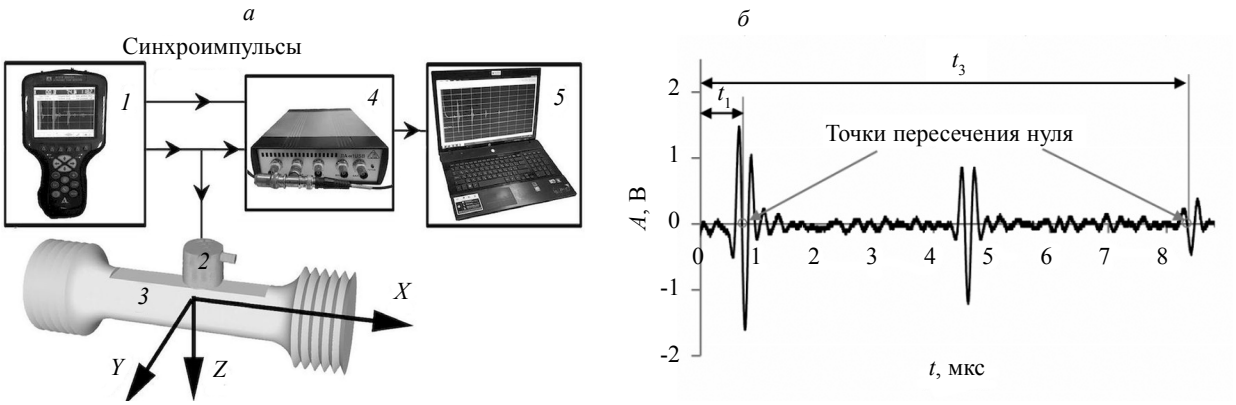

Рис. 2. Блок-схема установки для проведения акустических измерений (*а*):
1— ультразвуковой дефектоскоп; *2* — ПЭП; *3* — образец; *4* — цифровой осциллограф; *5* — компьютер. Амплитудно-временная диаграмма эхоимпульсов сдвиговой волны, точка перехода нуля между минимумом и максимумом в импульсе (*б*).

Генератор сигналов *1* подает электрические импульсы на пьезоэлектрический преобразователь *2*, который излучает в исследуемый образец *3* ультразвуковые сигналы. Сигналы достигают противоположной стороны образца, отражаются и возвращаются обратно в пьезоэлектрический преобразователь, который формирует электрические сигналы. Электрические сигналы из преобразователя и синхроимпульсы из генератора подаются на вход цифрового осциллографа *4*, откуда массив амплитудно-временной диаграммы в цифровом виде поступает на персональный компьютер *5*.

В настоящей работе для генерации электрических импульсов, возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, использовали серийно выпускаемый ультразвуковой дефектоскоп (модель А1212 МАСТЕР производства ООО «АКС», Россия). Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя брали цифровой осциллограф ЛА-н1USB (ООО «Руднев-Шиляев», Россия) и приложение ADCLab. Частота дискретизации цифрового осциллографа составляла 1 ГГц, разрешение развертки по времени — 1 нс. Применяли широкополосный малогабаритный совмещенный пьезоэлектрический преобразователь сдвиговых волн V157-RM производства Olympus с центральной частотой ~ 5 МГц и диаметром пьезоэлектрического элемента 3 мм. Акустическая длина пути между плоскопараллельными площадками в образце составила

14 мм. В качестве контактной жидкости использовали эпоксидную смолу без отвердителя. Полученная временная развертка сохранялась в файл данных для анализа и обработки в программе MathCAD. Время распространения упругих волн измеряли между первым t_1 и третьим t_3 отраженными импульсами по точкам перехода нуля между минимумом и максимумом в импульсе (рис. 2*б*). Погрешность измерения времени составляла не более 2 нс.

Как правило, многие материалы имеют некоторую анизотропию упругих свойств. В ортотропном материале (в нашем случае листовой прокат) в одном направлении могут распространяться три объемных волны — одна продольная и две поперечных, поляризованных вдоль и поперек осей упругой анизотропии [24].

Для описания анизотропии упругих свойств применяли следующее выражение [25]:

$$A = 2\frac{t_{zy} - t_{zx}}{t_{zy} + t_{zx}}, \tag{1}$$

где t_{zx} и t_{zy} — времена распространения поперечных упругих волн, поляризованных вдоль и поперек оси нагружения соответственно. Абсолютная погрешность измерения параметра A — $4 \cdot 10^{-4}$.

В. Вихретоковый контроль

Известно, что в сталях аустенитного класса при силовом воздействии могут происходить фазовые изменения. Из фазы аустенита γ с ГЦК-решеткой образуется фаза α′-мартенсита, имеющего, в общем случае, тетрагональную решетку. Вследствие того, что фаза α′-мартенсита является ферромагнитной, в отличие от парамагнитного аустенита, для исследования изменения магнитных свойств материала при фазовом превращении широко применяется вихретоковый контроль [12—13, 20—23]. Вихретоковый контроль содержания ферромагнитной фазы основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в аустенитной стали этим полем.

Структурно-чувствительные исследования изменения электромагнитных характеристик проводились с помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М» производства ООО «НПЦ «Кропус», Россия. Прибор был разработан, в том числе и для определения процентного содержания ферритной фазы Ф в аустенитных сталях. Устройство было откалибровано изготовителем по образцам с известным содержанием ферритной фазы. Относительная погрешность измерения не превышала 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Микроструктура основного материала типична для нержавеющих аустенитных сталей. Зерна аустенита имеют полиэдрическую форму с тонкими границами, двойниками отжига и мелкими точечными выделениями второй фазы (рис. 3*а*). Средний диаметр зерна в основном материале составил 35 мкм. В зоне термического влияния вблизи зоны сплавления наблюдается укрупнение аустенитных зерен (рис. 3*б*), средний диаметр зерна — 70 мкм. Структура сварного шва по краям имеет направленную, а в центре — дезориентированную дендритную структуру. Циклическое деформирование сварных образцов проводилось до образования магистральной трещины, которая распространялась по ЗТВ вдоль сварного шва (рис. 3*в*).

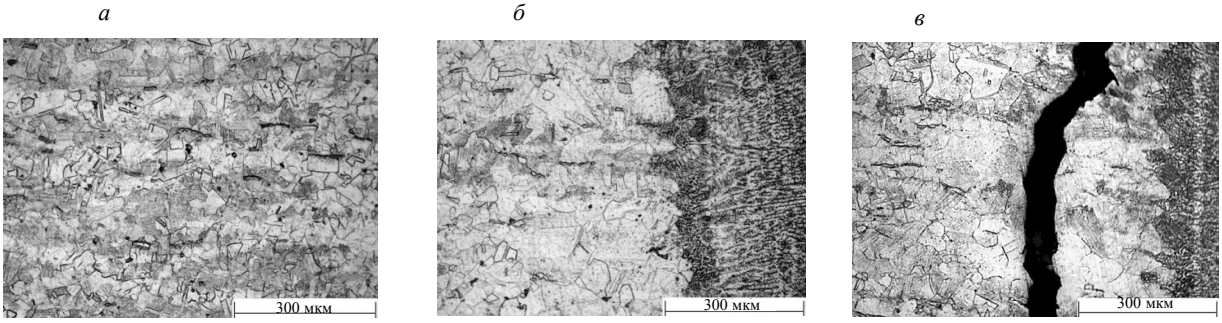

Рис. 3. Фотографии микроструктуры основного материала (*а*), ЗТВ и сварного шва в исходном состоянии (*б*) и после разрушения (*в*).

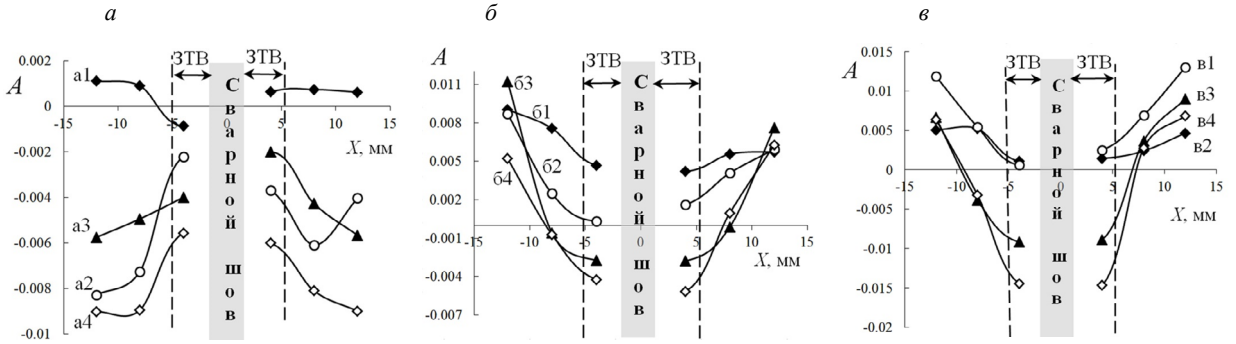

Рис. 4. Распределение параметра A вдоль образцов при амплитуде деформации ε_a = 0,3 % (*а*), ε_a = 0,4 % (*б*), ε_a = = 0,5 % (*в*), при количестве циклов N = 0 (а1, б1, в1), N = 3500 (а2), N = 5900 (а3), N = 7500 (а4), N = 500 (б2), N = 2700 (б3), N = 3800 (б4), N = 300 (в1), N = 600 (в2), N = 1400 (в3).

В результате ультразвуковых исследований получено время распространения сдвиговых волн различной поляризации в каждой зоне образцов и рассчитан по формуле (1) параметр акустической анизотропии A. Неоднородность распределения параметра акустической анизотропии A вдоль образца показана на рис. 4. Значения параметра A в зоне ОМ существенно отличается от значения в ЗТВ, что можно использовать для определения размера ЗТВ. В процессе циклического деформирования неоднородность распределения параметра акустической анизотропии A растет.

В процессе циклического деформирования выявлено, что изменение среднего значения параметра акустической анизотропии $\Delta\bar{A}$ как в ОМ, так и в ЗТВ монотонно уменьшаются для амплитуд деформации 0,3 и 0,4 (рис. 5*а*, *б*). Для амплитуды деформации цикла 0,5 на начальном этапе циклического деформирования наблюдается незначительный рост параметра $\bar{A}$ (рис. 5*в*). Интенсивность изменения параметра $\bar{A}$ в ОМ больше, чем в ЗТВ. При дальнейшем деформировании (N/N_f > 0,2, где N_f — число циклов до разрушения) происходит уменьшение $\bar{A}$. Интенсивность изменения параметра $\bar{A}$ в ЗТВ больше, чем в ОМ. Увеличение $\bar{A}$ на начальном этапе деформирования при ε_a = 0,5 % можно объяснить более существенным влиянием пластической составляющей в цикле на кристаллографическую текстуру и на анизотропию упругих и акустических свойств соответственно. Увеличение параметра A при пластическом деформировании нержавеющей стали аустенитного класса показано в работах [8, 21]. При дальнейшем циклическом деформировании, как и при пластическом, происходит упрочнение материала, разворот зерен затруднен, а интенсивность изменения текстуры уменьшается.

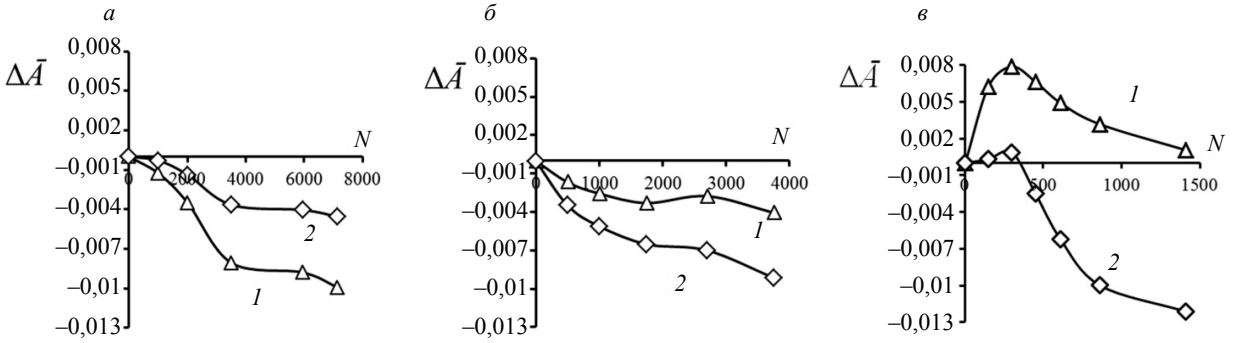

Рис. 5. Изменение параметра акустической анизотропии в ОМ (*1*) и в ЗТВ (*2*) для ε_a = 0,3 % (*а*), ε_a = 0,4 % (*б*), ε_a = 0,5 % (*в*) в процессе циклического деформирования.

Изменение среднего значения параметра акустической анизотропии $\Delta\bar{A}$ как в ОМ, так и в ЗТВ в процессе циклического деформирования чувствительно к амплитуде деформации цикла (рис. 6). В основном материале с увеличением амплитуды деформации цикла $\Delta\bar{A}$ увеличивается. В ЗТВ наблюдается обратный эффект: $\Delta\bar{A}$ уменьшается с увеличением ε_a.

В результате вихретокового контроля изменения электромагнитных свойств в процессе циклического деформирования получены монотонные зависимости изменения параметра Ф от ко-

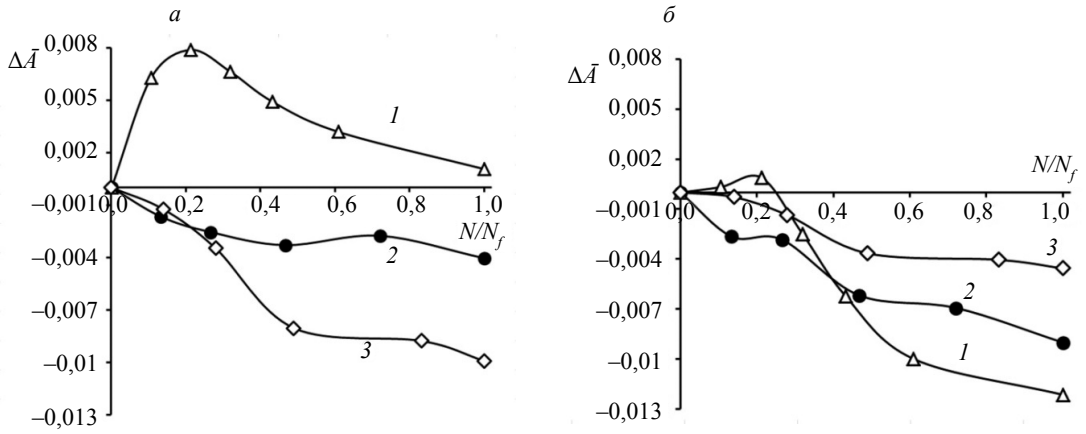

Рис. 6. Изменение параметра $\Delta\bar{A}$ в процессе циклического деформирования в ОМ (*а*) и ЗТВ (*б*) для ε_a = 0,3 % (*1*), ε_a = 0,4 % (*2*) и ε_a = 0,5 % (*3*).

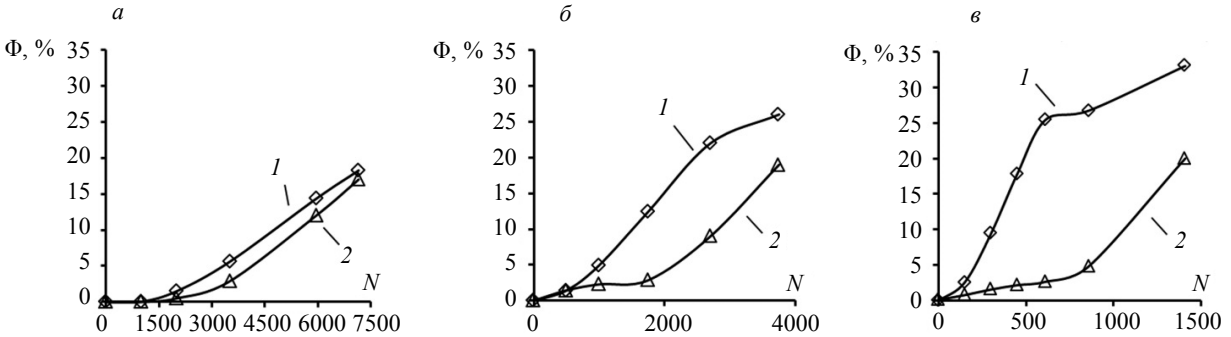

Рис. 7. Изменение параметра Ф в основном материале (*1*) и в ЗТВ (*2*) для ε_a = 0,3 % (*а*), ε_a = 0,4 % (*б*) и ε_a = 0,5 % (*в*) в процессе циклического деформирования.

личества циклов для трех амплитуд деформации цикла в зонах основного металла и термического влияния (рис. 7).

При наименьшей амплитуде деформации цикла (ε_a = 0,3 %) зависимости Ф(N) в основном металле и ЗТВ отличаются незначительно. Можно сделать вывод, что при малых амплитудах фазовые изменения в ОМ и ЗТВ происходят с одинаковой интенсивностью. С ростом амплитуды интенсивность изменения параметра Ф в ОМ становится более значительной, чем в ЗТВ.

Зависимости Ф(N/N_f) для ОМ чувствительны к амплитуде деформации (рис. 8*а*), что согласуется с ранее проведенными исследованиями [5, 23, 26].

В области малоцикловой усталости связь критического значения параметра Ф в ОМ с амплитудой деформации цикла можно описать линейной зависимостью:

$$\Phi_f = 75\varepsilon_a - 4. \quad (2)$$

При известной амплитуде деформации цикла в области МЦУ при регулярном режиме нагружения, используя формулу (2), можно предсказать значение параметра Φ_f, соответствующее разрушению материала. Этот факт можно использовать для прогнозирования момента разрушения сварного соединения.

В отличие от основного материала интенсивность изменения параметра Ф в ЗТВ практически одинакова для разных амплитуд деформаций. Это можно объяснить влиянием сварного шва и особенностью микроструктуры ЗТВ. Зависимости Ф(N/N_f) в области малоцикловой усталости можно описать одной кривой (рис. 8*б*).

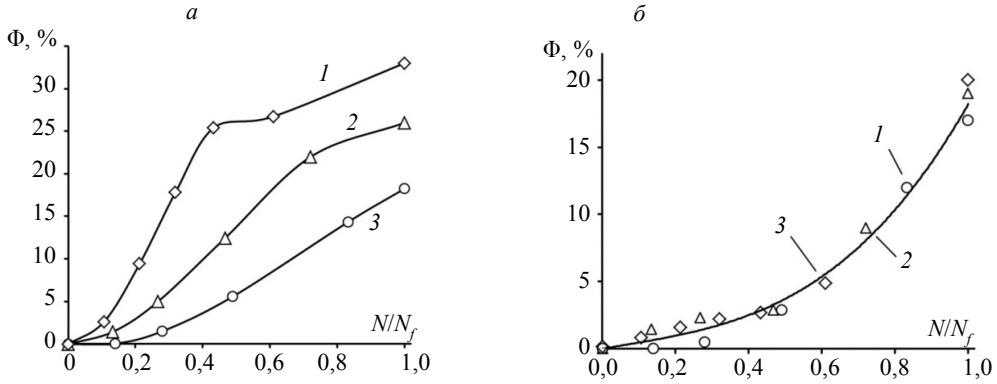

Рис. 8. Зависимости параметра Ф от N/N_f для основного материала (*а*) и ЗТВ (*б*) для ε_a = 0,3 % (*1*), ε_a = 0,4 % (*2*) и ε_a = 0,5 % (*3*).

Используя тот факт, что зависимости $\Phi(N/N_f)$ не чувствительны к амплитуде деформации цикла, можно определить относительное число циклов по результатам вихретокового контроля в ЗТВ по формуле:

$$\frac{N}{N_f} = 0,24\sqrt{\Delta\Phi}. \tag{3}$$

Рассчитанные по формуле (3) значения N/N_f хорошо согласуются с экспериментальными значениями (коэффициент корреляции 0,96) на рис. 9.

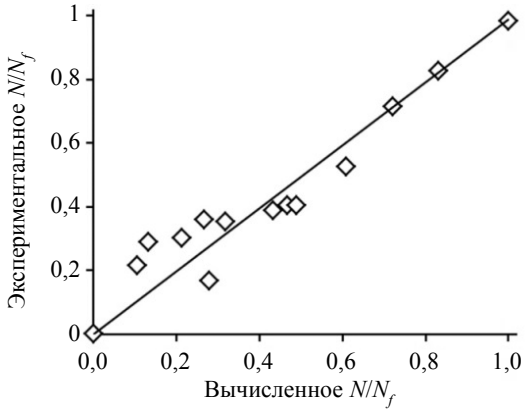

Рис. 9. Корреляционное поле относительного числа циклов.

Таким образом, используя формулу (3), можно рассчитать относительное число циклов и оценить усталостную поврежденность материала сварных соединений по результатам вихретокового контроля в зоне термического влияния. Данный подход имеет ряд ограничений, например, необходимо знать начальное состояние материала в ЗТВ и необходим обучающий эксперимент для конкретных сварных соединений с целью определения численного значения множителя, входящего в формулу (2). Дальнейшие исследования по этой теме могут быть направлены на учет влияния внешних факторов, начального структурного состояния, а так же амплитуд деформаций из более широкого диапазона.

ВЫВОДЫ

В результате ультразвукового и вихретокового контроля получено, что измеряемые параметры чувствительны к различиям структурного состояния в ЗТВ и ОМ. Совместное применение этих видов контроля позволяет повысить точность определения размеров ЗТВ в сварном соединении.

Установлено, что в процессе циклического деформирования неоднородность распределения параметра акустической анизотропии в зоне термического влияния и в основном материале увеличивается.

Интенсивность изменения параметра акустической анизотропии как в ОМ, так и в ЗТВ в процессе циклического деформирования чувствительна к амплитуде деформации цикла.

Получено, что с ростом амплитуды деформации цикла интенсивность фазовых изменений в ОМ становится более значительной, чем в ЗТВ.

Предложен способ оценки усталостной поврежденности материала сварных соединений в зоне термического влияния по результатам вихретокового контроля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kurashkin K.V., Mishakin V.V.* Ultrasonic Estimation of the Residual Stresses // Inorganic Materials. 2014. V. 50. No. 15. P. 1506—1510.

2. *Rosen A., Jago R., Kjer T.* Tensile properties of metastable stainless steels // J. Mater. Sci. 1972. V. 7. P. 870—876.

3. *Hecker S., Stout M., Staudhammer K., Smith J.* Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel: Part I. Magnetic measurements and mechanical behavior // Metall. Trans. A. 1982. V. 13. P. 619—626.

4. *Pegues J.W., Shao S., Shamsaei N., Schneider J.A., Moser R.D.* Cyclic strain rate effect on martensitic transformation and fatigue behaviour of an austenitic stainless steel // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2017. V. 40. P. 2080—2091.

5. *Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A.* The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel // Int. J. of Fatigue. 2018. V. 106. P. 153—158.

6. *Zeng W., Yuan H.* Mechanical behavior and fatigue performance of austenitic stainless steel under consideration of martensitic phase transformation // Mat. Sci. Eng. A. 2017. V. 679. P. 249—257.

7. *Khan A. N., Mehmood S. K., Mehmood K.* Effect of heat treatment on deformation induced martensite in austenitic stainless steel // Key Engineering Materials. 2012. V. 510—511. P. 214—220.

8. *Gonchar A.V., Klyushnikov V. A., Mishakin V. V.* Effect of plastic deformation and subsequent heat treatment on the acoustic and magnetic properties of 12Kh18N10T steel // Inorganic Materials. 2020. V. 56. No. 15. P. 1—5.

9. *Gauzzi F., Montanari R., Principi G., Tata M. E.* AISI 304 steel: anomalous evolution of martensitic phase following heat treatments at 400 °C // Materials Science and Engineering: A. 2006. V. 438—440. P. 202—206.

10. Неразрушающий контроль и диагностика / Справочник. Под ред. В. В. Клюева. М.: Изд-во Машиностроение, 1995. 488 с.

11. *Lois A., Ruch M.* Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing // Insight. 2006. V. 48. No. 1. P. 26–29.

12. *Khan S.H., Farhad A., Khan A. N., Iqbal M.A.* Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction // Computational Materials Science. 2008. V. 43. P. 623—628.

13. *Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N.* Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304L by eddy currents // Research in Nondestructive Evaluation. 2010. V. 21: 2. P. 112—126.

14. *Мамадалиев Р.А., Кусков В.Н., Бахматов П.В., Ильященко Д.П.* Влияние режимов сварки и различных источников тока на формирование сварного шва стали 12Х18Н10Т // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 4. С. 35—45.

15. *Ригмант М. Б., Ничипурук А. П., Худяков Б. А., Пономарев В.С., Терещенко Н.А., Корх М.К.* Приборы для магнитного фазового анализа изделий из аустенитных коррозионностойких сталей // Дефектоскопия. 2005. № 11. С. 3—14.

16. *Korkh M.K., Rigmant M.B., Sazhina E.Yu.* et al. Measuring Ferromagnetic Phase Content Based on Magnetic Properties in Two-Phase Chromium—Nickel Steels // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 11. P. 837—850. [*Корх М. К., Ригмант М. Б., Сажина Е. Ю., Кочнев А.В.* Измерение содержания ферромагнитной фазы по магнитным свойствам в двухфазных хромоникелевых сталях // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 32—44.]

17. *Корх М.К., Ригмант М. Б., Корх Ю.В., Ничипурук А. П.* Методы и приборы контроля фазового состава электрических и магнитных свойств хромоникелевых сталей // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 4. С. 4—12.

18. Сварка и свариваемые материалы / В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Изд-во Металлургия, 1991. 528 с.

19. *Полетаев Ю.В.* Сварка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок из аустенитных сталей / Монография. Ростов-на-Дону, 2018. 196 с.

20. *Mishakin V.V., Klyushnikov V. A.* Study of a welded joint of 12Kh18N10T steel using acoustic and magnetic methods // Inorganic Materials. 2018. V. 54. No. 15. P. 1498—1502.

21. *Gonchar A. V., Bizyaeva O. N., Klyushnikov V. A., Mishakin V. V.* Ultrasonic and eddy-current study of plastic deformation in austenitic steel welds // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 10. P. 610—616.

22. *Rubtsov V., Tarasov S., Kolubaev E., Psakhie S.* Ultrasonic phase array and eddy current methods for diagnostics of flaws in friction stir welds // AIP Conf. Proc. 2014. V. 1623. P. 539—542.

23. *Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M.* Estimating fatigue damage of austenitic steel by combining the ultrasonic and with eddy current monitoring // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. 38:4.

24. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Под ред. И.Г. Михайлова, В.В. Леманова. М.: Изд-во Мир, 1972. 308 с.

25. *Sayers C. M.* Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157—2167.

26. *Liu K., Zhao Z., Zhang Z.* Characterization of early fatigue microstructure in AISI 321 steel using eddy current non-destructive methodology // J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. 2013. V. 28. P. 1201—1206.

УДК 620.179.152.1

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ АРТЕФАКТОВ НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧНОСТИ И РАССЕЯНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2021 г. С.П. Осипов[1,*], Х.Д. Мирзоев[1], С.В. Чахлов[1,], О.С. Осипов[2], Е.Ю. Усачев[3]**

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30
[2]Medialooks, Россия 236016 Калининград, ул. Александра Невского, 59
[3]МИРЭА — Российский технологический университет, 119454 Москва, пр. Вернадского, 78
*E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru*

Поступила в редакцию 29.04.2021; после доработки 17.05.2021
Принята к публикации 17.05.2021

Предложена имитационная модель оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии в геометрии параллельного пучка на примере неоднородных объектов с осевой симметрией. Алгоритм моделирования состоит из блока формирования проекций и блока реконструкции изображений сечений объекта на основе обратного преобразования Абеля. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на MathCad. Эффективность алгоритма и программы продемонстрирована на примере многослойного шара. Доказана близость модельных и экспериментальных оценок радиальных распределений линейного коэффициента ослабления излучения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, рентгеновская компьютерная томография, линейный коэффициент ослабления, артефакт немоноэнергетичности, артефакт рассеяния, имитационное моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308221070058

ВВЕДЕНИЕ

Вся история развития компьютерной томографии (КТ) в различных ее реализациях от средств визуализации структуры объекта контроля (ОК) до средств измерений связана с исследованиями артефактов [1—3], обусловленных физическими и техническими факторами, и совершенствованием технических и алгоритмических средств снижения влияния этих артефактов до значений, приемлемых для конечных потребителей [4, 5]. Под артефактами в КТ понимаются отклонения распределений оценок информативных параметров по сечениям или объему ОК в целом от действительных распределений этих параметров. Артефакты вызываются физическими и техническими причинами [2, 6]. К физическим причинам относятся искажения законов испускания, взаимодействия и регистрации фотонного излучения от некоторых идеализированных законов и моделей, например, модели плоскопараллельного пучка моноэнергетического излучения. Технические причины обуславливаются невозможностью обеспечения соответствия реальных технических условий формирования информации «идеальной» модели. Исследование артефактов представляет интерес не только в классической КТ, но и в томографии на основе метода дуальных энергий (МДЭ) [7, 8], метода мультиэнергий (ММЭ) [9, 10] и спектральной томографии [11, 12]. Существенное влияние на смещение оценок распределений линейного коэффициента ослабления (ЛКО) рентгеновского излучения (РИ) (классическая КТ), распределений плотности и эффективного атомного номера (ЭАН) (КТ на основе МДЭ или ММЭ, спектральная КТ) по объему ОК оказывает ряд физических и технических факторов: немоноэнергетичность источника излучения [3, 4, 13, 14]; существенный вклад излучения, рассеянного в ОК в интегральный поток регистрируемого излучения [15—17]; наличие фонового излучения [18, 19]; непрозрачность части ОК для используемого излучения — «металлический артефакт» [2, 6, 20, 21]; послесвечение сцинтилляторов [22—24]; «мертвое время» детекторов [25—27] регистрирующих излучение в счетном и спектрометрическом режимах; уширение функции рассеяния точки [28, 29] в радиационных преобразователях (РП) излучения, обусловленное рассеянием, оптическим и (или) радиационным влиянием каналов друг на друга. Особое внимание физическим факторам при исследовании артефактов в КТ уделяется потому, что даже для «идеальной» системы КТ артефакты, обусловленные физикой взаимодействия РИ с веществом (испускание, «собственно взаимодействие» и регистрация), существуют и уменьшить их влияние на качество итоговых изображений можно специальными техническими, методическими и алгоритмическими приемами, усложняющими схемы систем КТ и их функционирование. К техническим причинам артефактов в КТ относят любое отклонение параметров основных компонентов соответствующих систем (источников рентгеновского

излучения (ИРИ), детекторов рентгеновского излучения (ДРИ), устройств позиционирования ОК от идеальных, например, неточное позиционирование каналов в ДРИ, изменение шага по углу при вращении объекта относительно взаимносвязанных ИРИ и ДРИ и т.п.

Особое место среди физических артефактов КТ занимают артефакты немоноэнергетичности и рассеяния. Причиной важности первого артефакта является природа РИ, у которого энергетический спектр далек от δ-функции. Значимость же рассеяния связана с естественным желанием потребителей получить от производителей системы КТ с максимально возможной производительностью. Производительность систем КТ зависит от типа ДРИ. Системы КТ с панельными ДРИ обладают существенно лучшей производительностью по сравнению с системами с линейными ДРИ, но и более значимым влиянием эффекта рассеяния на качество реконструкции.

Математическое и имитационное моделирование артефактов [10, 30—32] в КТ в настоящее время превалирует перед экспериментальной оценкой влияния того или иного физического фактора на качество контроля и измерений методом КТ.

В качестве объектов для оценки физических артефактов часто используют однородные цилиндры и шары [19, 25, 32—34]. Среди промышленных изделий можно выделить осесимметричные объекты с неоднородной по плотности и ЭАН структурой. Примером таких ОК являются, например, шаровые и кольцевые тепловыделяющие элементы, коаксиальные кабели, стальные трубы в оболочках и т.п. Для оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния применительно к КТ указанных выше ОК необходима соответствующая имитационная модель, которая должна быть наглядной, высокопроизводительной и допускать вариацию параметров ОК и систем КТ.

Имитационные модели оценки артефактов в КТ базируются на моделях формирования и обработки информации в КТ (например, [35]) и сводятся к их адаптации.

1. АДАПТАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЕКЦИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЪЕКТАМ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ

Адаптация модели формирования проекций [35] основывается на учете формы, структуры ОК и описании искажения модели физическим фактором, соответствующим исследуемому артефакту. Итоговая модель состоит из нескольких блоков.

1.1. Схема формирования идеальных проекций в КТ

Выше при описании понятия «артефакт в КТ» подчеркнуто, что искажения определяются относительно некоторой «идеальной» модели системы формирования «идеальных» проекций. «Идеальность» определяется моделью плоского (линейного) мононаправленного пучка моноэнергетического гамма-излучения. Энергетический спектр $f(E, E_0)$ источника гамма-излучения с энергией E_0 описывается δ-функцией Дирака:

$$f(E, E_0) = \delta(E - E_0). \tag{1}$$

В классической реализации КТ в качестве параметра, характеризующего материал ОК в точке $(x, y) \in \mathbf{S}$ (см. рис. 1) выступает линейный коэффициент ослабления (ЛКО) излучения $\mu(E_0, x, y)$. На рис. 1 введены две декартовых системы координат: неподвижная — XOY и подвижная — $X'O'Y'$, $O \in \mathbf{S}$ и $O' \in \mathbf{S}$. Здесь точки O и O' совпадают. Двумерная область $\mathbf{S}$ является ограниченным множеством, поэтому ее можно вписать в круг $\mathbf{R} \subset \Re^2$ радиусом R. На рис. 1 красной линией отмечен луч $\mathbf{L}(\theta, x')$, проходящий через точку x' под углом θ. При формировании проекции $\mathbf{P}_\theta$ — совокупности интегралов от функции μ по параллельным лучам, соответствующим углу θ, луч перемещается в перпендикулярном направлении, обозначенном на рис. 1 красной пунктирной стрелкой.

Связь систем координат XOY и $X'OY'$ описывается преобразованиями поворота:

$$\begin{cases} x' = x\cos\theta + y\sin\theta \\ y' = -x\sin\theta + y\cos\theta \end{cases}, \quad \begin{cases} x = x'\cos\theta - y'\sin\theta \\ y = x'\sin\theta + y'\cos\theta \end{cases}. \tag{2}$$

Обозначим $\mu_0(x, y) = \mu(E_0, x, y)$. Формула для оценки идеальных проекций $\mathbf{P}_\theta$, $0 \le \theta \le 2\pi$, для рассматриваемых ОК примет вид:

$$\mathbf{P}_\theta = \left\{ P(E_0, x', \theta) = \int\limits_{L(\theta, x')} \mu_0(x', y')\,\mathrm{d}\,y' \,\middle|\, -R \le x' \le R \right\}, \tag{3}$$

где $\mu_0(x, y) = 0$ для $(x, y) \in \mathbf{R} \backslash \mathbf{S}$; $P(E_0, x', \theta)$ — толщина ОК по лучу $L(\theta, x')$ в длинах свободного пробега (д.с.п.).

Для иллюстрации на рис. 1 представлено изображение сечения трехслойного шара.

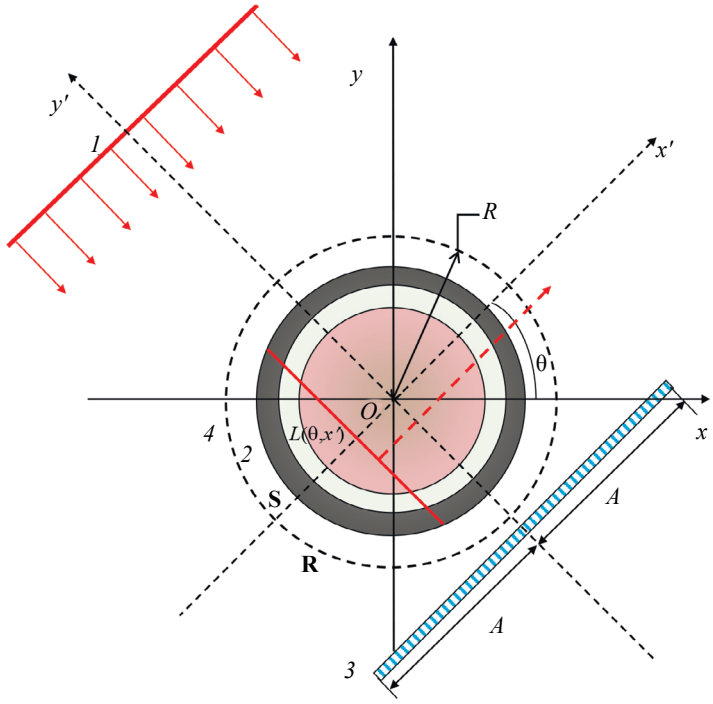

Рис. 1. Схема формирования проекций в КТ в геометрии параллельного пучка:
1 — ИРИ; *2* — ОК; *3* — линейный ДРИ; *4* — окружность, описывающая сечение ОК.

Совокупность идеальных проекций **P** равна объединению единичных проекций (3):

$$\mathbf{P} = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} \mathbf{P}_{\theta}. \tag{4}$$

Замечание 1. Для тел вращения при совпадении точки *O* системы координат *XOY* с центром вращения *O'* проекции для разных ракурсов одинаковы:

$$\forall \theta_1, \theta_2 \ (0 \le \theta_1 \le 2\pi) \wedge (0 \le \theta_2 \le 2\pi) \wedge (\theta_1 \ne \theta_2) \Rightarrow \mathbf{P}_{\theta_1} \equiv \mathbf{P}_{\theta_2}. \tag{5}$$

Замечание 2. Соблюдение наложения точек *O* и *O'* друг на друга имеет исключительно важное значение для производительности сканирования в томографии применительно к рассматриваемому классу объектов и влияет на выбор алгоритма обработки информации и производительность реконструкции изображений сечений.

1.2. Исходные параметры виртуальной системы КТ

Исходные параметры виртуальной системы КТ сопоставляются не только с числами, с материалами (плотности и соответствующие ЭАН), но и с функциями, например, с энергетическим спектром излучения. В блок исходных параметров входят параметры, характеризующие ИРИ и ДРИ, а также поворотный стол.

1.2.1. Характеристики источника рентгеновского излучения

К параметрам ИРИ относятся: режим излучателя — импульсный или непрерывный; частота следования импульсов для импульсного режима ν, Гц; максимальная энергия РИ E_{max}; ЭАН материала мишени в рентгеновском аппарате Z_t; материал предварительного фильтра, плотность ρ_f, г/см^3,

Z_f; поток фотонов, попадающих на фронтальную поверхность детектора линейного ДРИ в случае отсутствия ОК, n_0, фотонов/(см^2×с); энергетический спектр ИРИ $f(E, E_{\max})$ с учетом характеристических линий материала мишени и ослабления материалом предварительного фильтра.

1.2.2. Характеристики детектора рентгеновского излучения

Основными параметрами ДРИ являются: режим регистрации — счетный или интегральный; тип детектора — линейный или панельный; количество детекторов в детекторе M_L для линейного ДРИ или $M_F \times N_F$ для панельного ДРИ; материал РП, плотность ρ_d, г/см^3, ЭАН Z_d; толщина h_d, см; размер элемента РП в направлении, перпендикулярном распространению излучения, $a_d \times b_d$, см^2; разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) k_{ADC}; время формирования цифрового сигнала (ЦС) Δt; предельный уровень ЦС для интегрального режима регистрации $C_{\lim}$:

$$C_{\lim} < 2^{k_{\text{ADC}}} - 1 = C_{\max}. \tag{6}$$

1.2.3. Параметры поворотного стола

Поворотный стол предназначен для вращения ОК и обеспечения сканирования его (объекта) пучком РИ и формирования совокупности проекций $\mathbf{P}_\theta$, $0 \le \theta \le 2\pi$.

Замечание 3. В работе рассматривается класс симметричных ОК, для которых при сканировании должно выполняться замечание 1. В этом случае в соответствии с формулой (4) совокупность проекций состоит из одной проекции.

Для обеспечения рационального расположения ОК перед системой ИРИ+ДРИ поворотный стол также обеспечивает поступательное перемещение объекта по вертикали.

Главными потребительскими параметрами поворотного стола являются: режим вращения — непрерывный или дискретный; режим вертикального перемещения — непрерывный или дискретный; угловая скорость вращения для непрерывного режима вращения ω, оборот/с; шаг по углу для дискретного режима вращения $\Delta\theta$, °; скорость вертикального перемещения для непрерывного режима V_v, мм/с; шаг вертикального перемещения для дискретного режима Δz, мм.

Отметим, что дискретность процессов формирования информации в целом приводит к условной замене в математической модели КТ непрерывных режимов (вращения, перемещения) дискретными. В результате можно принять, что параметры поворотного стола характеризуют шаг по углу $\Delta\theta$, ° и шаг перемещения по вертикали Δz, мм.

Остановимся на непрерывном режиме излучения и интегральном режиме регистрации фотонов.

1.3. Формирование реальных проекций в КТ

Объект контроля просвечивается пучком РИ с регистрацией фотонов линейным или панельным ДРИ. Энергия фотонов, поглощенных в РП, трансформируется или в энергию светового потока, а затем в электрический заряд, или в электрическую энергию непосредственно. Электрическая энергия преобразуется в аналоговый сигнал (АС).

1.3.1. Формирование и преобразование исходной информации в проекции

Исходная информация в КТ представляет собой совокупность АС. Выражение связи АС I_r в точке x' детектора для угла θ с параметрами ИРИ, ОК и ДРИ имеет вид:

$$I_r(x',\theta) = Cn_0 a_d b_d \int_0^{E_{\max}} E_{\text{ab}}(E, a_d, b_d, h_d) f(E, E_{\max}) \mathrm{e}^{-P(E,x',\theta)} \varepsilon\left(E, h_d\right) \mathrm{d}E, \tag{7}$$

где C — коэффициент трансформации поглощенной энергии РИ в электрическую энергию; $E_{\text{ab}}(E,\ a_d,\ b_d,\ h_d)$ — среднее значение зарегистрированного фотона с энергией E; $\varepsilon\left(E, h_d\right) = 1 - \mathrm{e}^{-\mu(E,\rho_d,Z_d)h_d}$ — эффективность регистрации.

Совокупность АС $\mathbf{I} = \left\{I_r(x',\theta)\right\}$, где $\left|x'\right| \le A$, $0 \le \theta \le 2\pi$, трансформируется с помощью АЦП в соответствующий набор цифровых сигналов (ЦС) $\mathbf{I}_d$:

$$\mathbf{I}_d = \left\{ I_d(x',\theta) = \operatorname{int}\frac{I_r(x',\theta)}{\Delta_d} \right\}, \tag{8}$$

где $\operatorname{int}(x)$ — целая часть аргумента x; $\Delta_d = \dfrac{C_{\lim} I_r(A,\theta)}{2^{k_{\text{ADC}}} - 1}$ — разрешение АЦП.

Набор ЦС $\mathbf{I}_d$ преобразуется в совокупность проекций для РИ $\mathbf{P}_X$:

$$\mathbf{P}_X = \{P_X(x',\theta) = \ln I_d(A,\theta) - \ln I_d(x',\theta)\}. \quad (9)$$

Для практического воплощения обобщенной модели формирования совокупности проекций в КТ формула (7) нуждается в уточнении и конкретизации. Для описания энергетических спектров ИРИ используют формулу Крамерса $f_K(E, E_{\max})$ [36], дополняя ее учетом характеристического излучения и ослаблением РИ предварительным фильтром.

1.3.2. Адаптация модели формирования проекций с учетом трансформации энергетического спектра источника рентгеновского излучения

Энергетический спектр ИРИ $f^*(E, E_{\max})$ состоит из суммы энергетических спектров тормозного и характеристического излучений [37]. С учетом вкладов α_χ энергетических линий E_χ в общий поток РИ искомый энергетический спектр представим формулой:

$$f^*(E,E_{\max}) = \left(1-\sum\alpha_\chi\right) f_K(E,E_{\max}) + \sum\alpha_\chi\delta(E-E_\chi). \quad (10)$$

Предварительная фильтрация приводит к трансформации $f^*(E, E_{\max})$ в $f(E, E_{\max})$:

$$f(E,E_{\max}) = \frac{f^*(E,E_{\max})\mathrm{e}^{-m(E,\rho_f)h_f}}{\int_0^{E_{\max}} f^*(E,E_{\max})\mathrm{e}^{-m(E,\rho_f)h_f}\,\mathrm{d}E}. \quad (11)$$

Замечание 4. Калибровка «по белому» (деление измеренного сигнала с ОК на сигнал без ОК) делает процедуру нормировки (11) излишней.

Обозначим $\mathbf{p}_f = \begin{pmatrix} Z_f & \rho_f & h_f \end{pmatrix}, \mathbf{p}_d = \begin{pmatrix} a_d & b_d & h_d \end{pmatrix}$ и

$$f_{\mathrm{ab}}\left(E,\mathbf{p}_f,\mathbf{p}_d\right) = E_{\mathrm{ab}}(E,\mathbf{p}_d) f(E,E_{\max})\mathrm{e}^{-m(E,Z_f)\rho_f h_f}\,\varepsilon\left(E,h_d\right). \quad (12)$$

Применение свойств δ-функции позволяют избежать сложностей, связанных с ее аппроксимацией. После подстановки (9)—(11) в (7) и обозначения $C_n = Cn_0a_db_d$, получим:

$$I_\chi(x',\theta) = C_n\left(\sum\alpha_\chi f_{\mathrm{ab}}\left(E_\chi,\mathbf{p}_f,\mathbf{p}_d\right)\mathrm{e}^{-P(E_\chi,x',\theta)} + \left(1-\sum\alpha_\chi\right) I_r(x',\theta)\right). \quad (13)$$

Выражения (7)—(13) являются основой адаптивной модели формирования проекций применительно к задаче оценки артефакта немоноэнергетичности и уровня снижения его (артефакта) в случае предварительной фильтрации.

1.3.3. Учет рассеяния излучения при формировании проекций в КТ

Наличие фотонов, рассеянных в объеме ОК и зарегистрированных ДРИ, существенным образом ухудшает качество реконструкции изображений сечений в КТ. Снижение доли рассеяния в потоке регистрируемого излучения достигается ограничением рассеивающего объема с помощью коллиматоров [38, 39], что сложно реализовать для панельных ДРИ, для которых доля рассеяния снижается за счет рационального выбора $E_{\max}$ и ограничений на размеры ОК (размеры меньше — вклад меньше). Для линейных ДРИ эффективно одновременное использование коллиматоров источника и детектора.

Вклад рассеяния характеризуется фактором накопления (энергии, числа фотонов) излучения B. Фактор накопления энергии представим в виде $B_E=1+I_s/I=1+k_E$, здесь I_s — аналоговый сигнал для рассеянного излучения. Коэффициент k_E зависит [39, 40] от энергии E, ЭАН Z и толщины ОК по лучу с параметрами (x', θ) в д.с.п. $P(E, x', \theta)$.

Из вышесказанного следует, что формула расчета АС для учета рассеяния I_s при формировании совокупности проекций $\mathbf{P}_S$ примет вид:

$$\frac{I_s(x',\theta)}{I_\chi(x',\theta)} = 1 + C_n\left(\begin{array}{l}\sum\alpha_\chi f_{\mathrm{ab}}\left(E_\chi,\mathbf{p}_f,\mathbf{p}_d\right)k_E(E_\chi,P(E_\chi,x',\theta),Z)\mathrm{e}^{-P(E_\chi,x',\theta)} + \\ +\left(1-\sum\alpha_\chi\right)\int_0^{E_{\max}} f_{\mathrm{ab}}\left(E_\chi,\mathbf{p}_f,\mathbf{p}_d\right)k_E(E,P(E,x',\theta),Z)\mathrm{e}^{-P(E,x',\theta)}\,\mathrm{d}E\end{array}\right). \quad (14)$$

Формула (14) является основой имитационного моделирования проекций в КТ с учетом рассеяния фотонов в ОК.

2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПРОЕКЦИЙ В КТ

В работе [35] отмечено, что формулы для оценки проекций для ОК, структурно состоящих из фрагментов с сечениями в форме квадратов или кругов, имеют достаточно простое аналитическое описание. В статьях [35, 41] приведены подходы к формированию проекций для любых сечений, для которых имеются оптические изображения.

В настоящее время разработано значительное количество алгоритмов реконструкции проекций в КТ [42—44], отличающихся по преобразованиям, производительности и устойчивости к возмущениям. Обсудим некоторые из них.

2.1. Реконструкция с помощью обратного преобразования Радона

На вход алгоритма реконструкции поступает совокупность проекций **P**. Распределение ЛКО $\mu(x, y)$ по сечению ОК находится по формуле [45, 46]:

$$\mu(x,y) = -\frac{1}{(2\pi)^2}\int_0^{2\pi}\int_{-R}^{R}\frac{\dfrac{\partial P(s,\varphi)}{\partial s}}{s - x\cos\varphi - y\sin\varphi}\,\mathrm{d}s\mathrm{d}\varphi. \tag{15}$$

Из анализа выражения (15) можно сделать вывод о вычислительной сложности подхода Радона к реконструкции изображений сечений.

2.2. Реконструкция методом обратной проекции с фильтрацией

Метод обратной проекции с фильтрацией (ОПФ) продолжает оставаться одним из самых востребованных способов реконструкции изображений в КТ [35, 42, 47, 48]. Метод ОПФ состоит из этапов фильтрации и обратной свертки.

2.2.1. Фильтрация исходных проекций

На этапе фильтрации исходная совокупность проекций **P** трансформируется в совокупность фильтрованных проекций $\mathbf{P}_f$ с помощью операции свертки:

$$P_f(x',\theta) = \int P(s,\theta)h(x'-s)\,\mathrm{d}s, \tag{16}$$

здесь h — фильтр, например, Шеппа—Логана [49].

2.2.2. Обратная свертка

Совокупность проекций $\mathbf{P}_f$ поступает на блок реконструкции и подвергается преобразованию (обратной свертке). В результате отмеченного преобразования формируется оценка распределения ЛКО $\hat{\mu}(x,y)$ по сечению ОК:

$$\hat{\mu}(x,y) = \int_0^{2\pi} P_f(x\cos\theta + y\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta. \tag{17}$$

Распределение $\hat{\mu}(x,y)$ является результатом реконструкции. При необходимости для визуализации его трансформируют в полутоновое изображение.

Для рассматриваемого типа ОК методом КТ оценивается радиальное распределение ЛКО $\hat{\mu}(r)$. Для реконструкции $\hat{\mu}(r)$ применяется частный случай обратного преобразования Радона — обратное преобразование Абеля (ОПА).

2.3. Оценка радиального распределения ЛКО с помощью ОПА

Методы КТ широко используются для контроля ОК с осевой симметрией, см., например, [50—52]. В связи с расширением номенклатуры промышленных изделий из описанного выше класса наблюдается тенденция увеличения исследований, касающихся реконструкции изображений с помощью ОПА [52—54].

Обратное преобразование Абеля связывает совокупность **P**, состоящую из одной проекции, с оценкой распределения ЛКО $\hat{\mu}(r)$:

$$\hat{\mu}(r) = -\frac{1}{\pi}\int_r^R \frac{P'(q)}{\sqrt{q^2 - r^2}}\,\mathrm{d}q. \tag{18}$$

Заметим, что выражение (18) имеет практическое применение при условии выполнения замечаний 1 и 2.

Естественно ожидать, что вычисление интегралов вида (18) по точности и производительности существенно превосходит вычисление интегралов (15)—(17).

2.4. Наличие артефакта и его мера

Полученные в ходе реконструкции оценки распределений $\hat{\mu}(x, y)$ или $\hat{\mu}(r)$ можно считать несмещенными и говорить об отсутствии артефактов, если с достаточным уровнем близости выполняются соответствующие приблизительные равенства:

$$\hat{\mu}(x, y) \approx \mu(x, y), \;\; \hat{\mu}(r) \approx \mu(r). \tag{19}$$

Если же равенства (19) не выполняется, то мерой артефакта, вызываемого физическим фактором Ф, является функция $\Delta_{\Phi}(x, y)$ или функция $\Delta_{\Phi}(r)$:

$$\Delta_{\Phi}(x, y) = \hat{\mu}(x, y) - \mu(x, y), \;\; \Delta_{\Phi}(r) = \hat{\mu}(r) - \mu(r). \tag{20}$$

Для реконструкции сечений рассматриваемого ОК будем использовать ОПА.

Совокупность выражений (1)—(20) представляет собой имитационную модель формирования и обработки информации в КТ с учетом артефактов немоноэнергетичности и рассеяния. Эта модель реализована в виде программы в системе MathCad, которая использовалась для моделирования артефактов в КТ на примере многослойного шара.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АРТЕФАКТОВ В КТ НА ПРИМЕРЕ ШАРОВ

Для оценки работоспособности разработанных моделей и программ был выбран пятислойный шар с толщинами слоев, равными 4 мм. Наиболее полно ОК характеризуют вектора радиусов слоев **Rs**, плотности материалов слоев ρ**s** и ЭАН **Zs**. Пример иллюстративный, поэтому выберем следующие значения характеристик ОК:

$$\mathbf{Rs}:=\begin{pmatrix}4 & 8 & 12 & 16 & 20\end{pmatrix},\ \boldsymbol{\rho}\mathbf{s}:=\begin{pmatrix}8{,}5 & 1 & 2{,}7 & 1{,}6 & 7{,}8\end{pmatrix},\ \mathbf{Zs}:=\begin{pmatrix}29 & 5 & 13 & 9 & 26\end{pmatrix}.$$

Радиусы приведены в мм, плотность в г/см^3.

Для регистрации фотонного излучения выбран линейный ДРИ на основе CsI, ρ_d = 4,51 г/см^3, h_d = 1 мм, k_{ADC} = 16, A = 25 мм, $a_d = b_d$ = 0,1 мм.

3.1. Моделирование и обработка проекций для гамма-излучения

«Идеальная» проекция моделируется для источника гамма-излучения с энергией E_0 = 179 кэВ. Для моноэнергетического источника в процедуре вычислений отсутствуют интегралы, поэтому процесс моделирования отличатся высоким быстродействием, для примера: время формирования проекций для пяти сечений ОК не превышает полминуты. Для наглядности рассматривались сечения на равном удалении от границ каждого слоя.

На рис. 2 приведены результаты реконструкции изображений пяти сечений и радиальные распределения оценок ЛКО $\mu r(r)$ и истинные распределения $\mu 0(r)$.

Из анализа реконструированных изображений и сравниваемых графиков распределений, представленных на рис. 2, можно сделать вывод о возможности использования предложенных моделей и программ для исследования влияния физических артефактов на качество восстановления изображений сечений не только рассматриваемого тестового объекта, но и любого другого осесимметричного ОК.

Далее используем предложенные модели и алгоритмы для оценки анализируемых артефактов. Логично исследовать артефакты по мере усложнения модели. Поэтому начнем с учета рассеяния для источников моноэнергетического гамма-излучения.

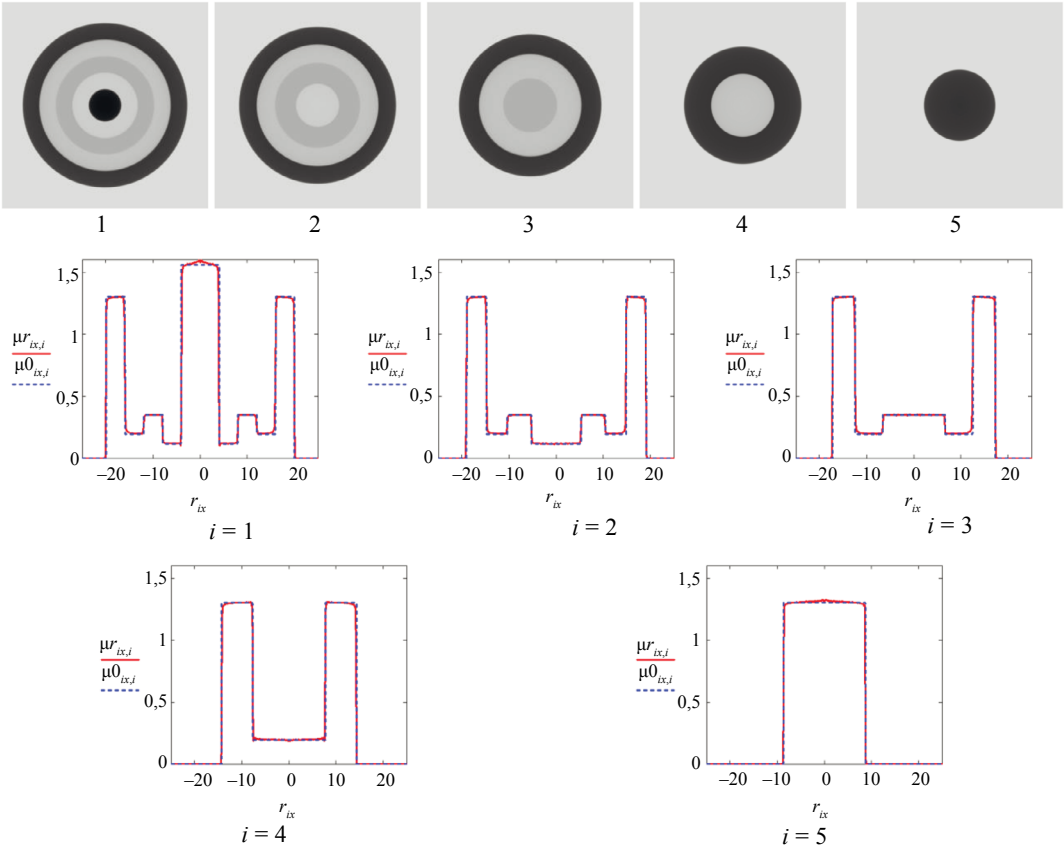

Рис. 2. Результаты реконструкции изображений сечений шарового пятислойного объекта для источника гамма-излучения с энергией E_0=179 кэВ.

3.2. Оценка артефактов рассеяния в КТ для моноэнергетического гамма-излучения

Выше отмечено, что наиболее простой способ учета рассеяния базируется на выражении (14). Коэффициент k_E может принимать большие значения. Применение коллиматоров позволяет снизить значения коэффициента k_E до уровня 0,1 и менее.

На рис. 3 приведены распределения $\mu r(r)$ для k_E = 0,1 для сечений шара. Оценка распределения ЛКО гамма-излучения с учетом рассеяния, как показывают данные, приведенные на рис. 3, может оказаться существенно заниженной.

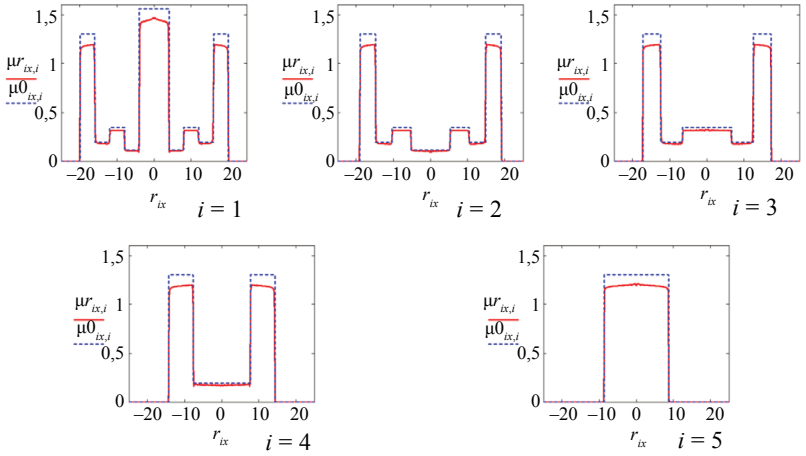

Рис. 3. Сравнение реконструируемых $\mu r(r)$ и реальных $\mu 0(r)$ радиальных распределений ЛКО для сечений пятислойного шара и источника гамма-излучения E_0 = 179 кэВ с учетом рассеяния для k_E = 0,1.

3.3. Моделирование артефактов немоноэнергетичности в КТ

Для рассмотренного выше примера ОК исследуем влияние артефакта немоноэнергетичности. Для этого в качестве источника фотонов используется ИРИ с максимальной энергией E_{max} = 300 кэВ. Для фильтрации РИ применяется фильтр из меди h_f= 1 мм.

Для построения идеальной проекции и проведения процесса реконструкции выбор эффективного ЛКО осуществлялся для луча, проходящего через центр ОК.

3.3.1. Энергетический спектр без учета характеристического излучения

На рис. 4 для трех сечений ОК приведена визуализация артефакта немоноэнергетичности в виде реконструированных изображений и радиальных распределений оценок ЛКО.

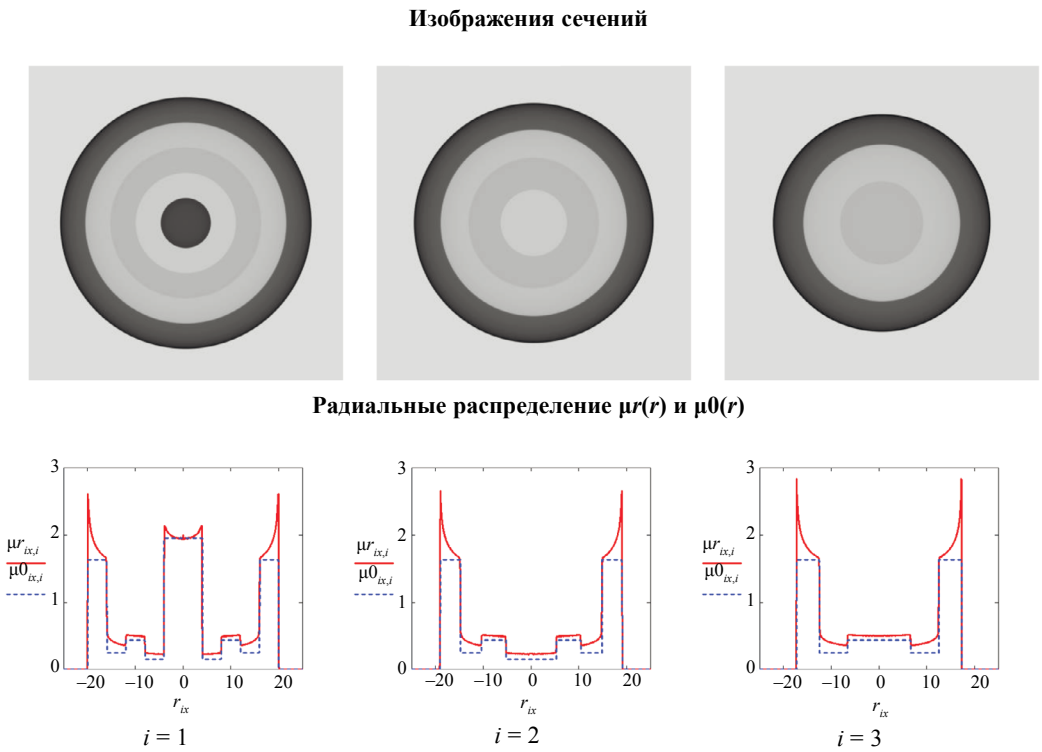

Рис. 4. Визуализация артефакта немоноэнергетичности для сечений шара, медный фильтр, h_f= 1 мм.

На реконструированных изображениях сечений наблюдается заметное потемнение исключительно на границах внешнего слоя многослойного шара. Графики $\mu r(r)$ позволяют более наглядно и детально исследовать влияние немоноэнергетичности излучения, поэтому для дальнейших примеров будем приводить именно их.

Смещение ЛКО, исходя из анализа графиков, приведенных на рис. 4, может достигать 70 %. Этот факт свидетельствует о значимости артефакта немоноэнергетичности на точность оценки распределений ЛКО по сечениям и о невозможности оценки плотности в конкретной точке сечения ОК с приемлемой точностью, например, 5 %. Толщины 1 мм медного фильтра для должной фильтрации РИ с E_{max} = 300 кэВ явно недостаточно. Увеличение толщины предварительного фильтра [50] приводит к превращению ИРИ в псевдо-монохроматический источник излучения.

Был проведен вычислительный эксперимент по формированию и обработке информации в КТ для приведенных выше условий и h_f= 15 мм. На рис. 5 приведены распределения оценок ЛКО $\mu r(r)$ для первых характерных слоев шара.

Анализ распределений $\mu r(r)$ подтверждает упомянутый ранее вывод.

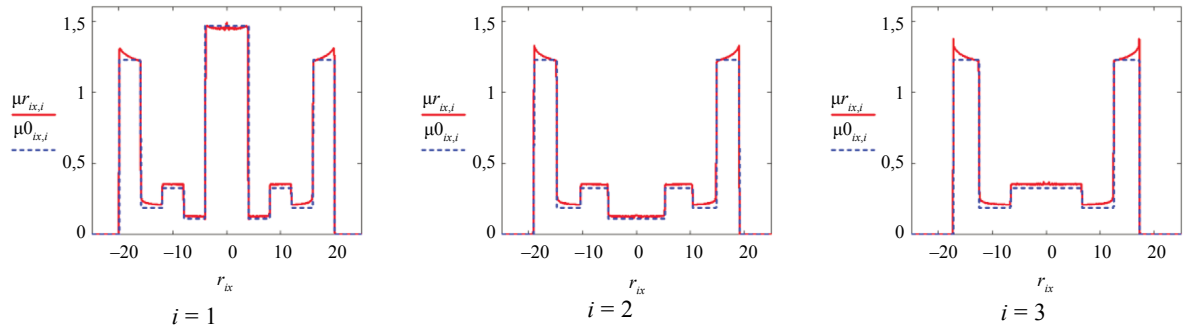

Рис. 5. Радиальные распределения $\mu r(r)$ и $\mu 0(r)$ с учетом артефакта немоноэнергетичности для сечений шара, медный фильтр h_f= 15 мм.

3.3.2. Энергетический спектр с учетом характеристического излучения

Было проведено имитационное моделирование для РИ с учетом характеристического излучения, образующегося в вольфрамовой мишени (α_χ = 0,05, E_χ = 59,3 кэВ). На рис. 6 для этого случая приведены радиальные распределения оценок ЛКО $\mu r(r)$ и $\mu 0(r)$ для трех сечений ОК. Расчеты проведены для медного фильтра толщиной h_f = 15 мм.

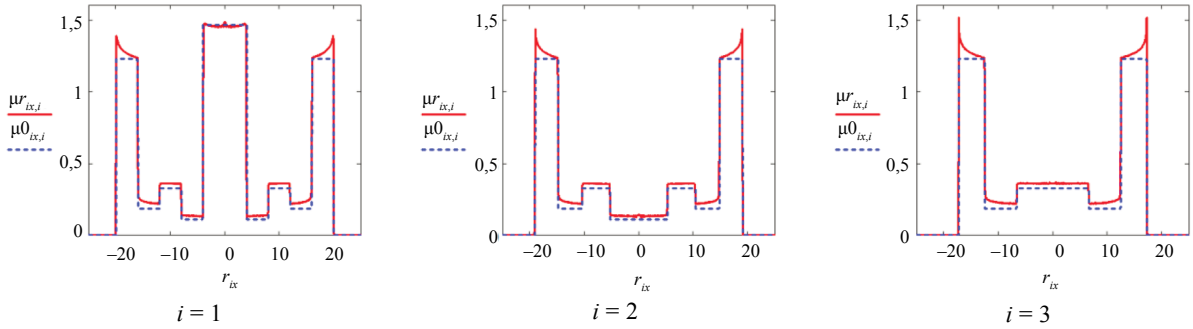

Рис. 6. Радиальные распределение $\mu r(r)$ и $\mu 0(r)$ с учетом артефакта немоноэнергетичности с характеристическим излучением α_χ=0,05, E_χ=59,3 кэВ для сечений шара, медный фильтр h_f= 15 мм.

Из анализа данных, представленных на рис. 6, можно сделать вывод о том, что вклад характеристического излучения в поток РИ влияет на смещение оценки радиального распределения ЛКО, несмотря на жесткую фильтрацию первичного потока излучения.

3.4. Совместный артефакт немоноэнергетичности и рассеяния

Для оценки совместного артефакта немоноэнергетичности и рассеяния был проведен вычислительный эксперимент для условий предыдущего пункта с учетом эффекта рассеяния для k_E = 0,1. На рис. 7 приведены соответствующие радиальные распределения оценок ЛКО для трех сечений ОК.

На графиках радиальных распределений смещения оценок менее выражены, чем для артефакта рассеяния, что объясняется разнонаправленностью влияния немоноэнергетичности излучения и рассеяния на оценку ЛКО.

4. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОЦЕНОК АРТЕФАКТОВ НЕМОНОЭНЕРГЕТИЧНОСТИ И РАССЕЯНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Для проверки работоспособности и эффективности разработанной модели необходимо подтвердить близость модельных и экспериментальных оценок анализируемых артефактов.

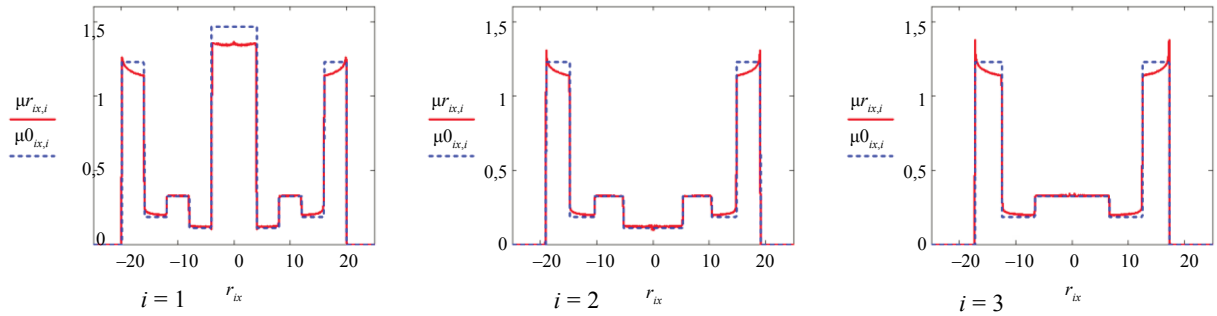

Рис. 7. Радиальные распределения $\mu r(r)$ и $\mu 0(r)$ с учетом артефактов немоноэнергетичности РИ с характеристическим излучением α_χ=0,05, E_χ=59,3 кэВ и рассеяния для k_E= 0,1 для сечений шара, медный фильтр h_f= 15 мм.

4.1. Артефакт немоноэнергетичности

В качестве основы для сравнения модельных и экспериментальных оценок артефакта немоноэнергетичности были использованы результаты [32]. В указанной работе приведены экспериментальные распределения оценок ЛКО для двух объектов. Первый объект представляет собой куб из полиметилметакрилата (ПММА) размерами 10×10×10 мм^3 с симметрично расположенным внутри по центру цилиндром из алюминия радиусом 2,5 мм. Второй объект сконструирован аналогично, но куб изготовлен из алюминия, а цилиндр из ПММА. В качестве источника фотонов использовался рентгеновский аппарат непрерывного действия с максимальной энергией E_{max} = 50 кэВ с мишенью из молибдена. Характеристическое излучение молибдена представлено линиями K_α и K_β с энергиями 17,5 кэВ и 19,6 кэВ соответственно. Толщина алюминиевого фильтра h_f= 2 мм. Толщина чувствительного слоя детектора h_d= 0,45 мм Si. Режим детектирования фотонов счетный с порогом 5 кэВ. Размер пикселя с учетом геометрического увеличения $a_d = b_d \approx$ 0,1 мм.

При моделировании артефактов вместо внешнего куба [32] был использован цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10 мм. На рис. 8 приведены модельные оценки радиальных распределений $\mu r(r)$ для описанного выше примера для внешних цилиндров из алюминия и ПММА.

Сравнение распределений, приведенных на рис. 8, с экспериментальными графиками из [32]

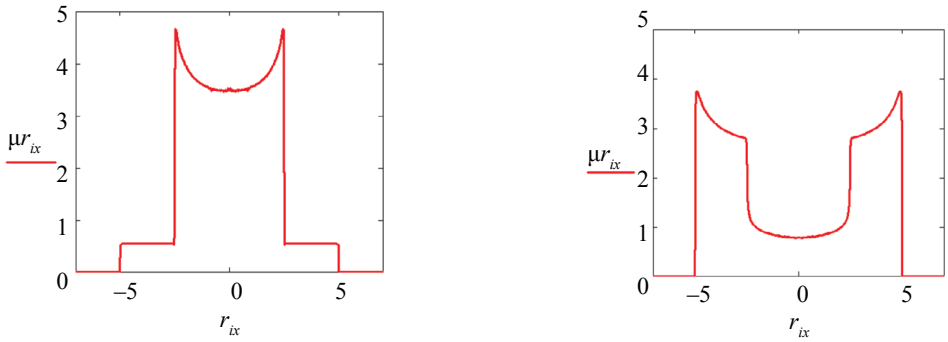

Рис. 8. Модельные оценки радиальных распределений $\mu r(r)$ для примера из [32] для центральных сечений исследуемых объектов.

подтверждает близость оценок распределений ЛКО, полученных экспериментально и методом имитационного моделирования. Расхождение между модельными и экспериментальными оценками пространственных распределений ЛКО в характерных точках графиков (локальные максимумы и минимумы) не превосходит 2,5 %. Такой точности моделирования вполне достаточно, так расхождение в оценках ЛКО для двух рассматриваемых объектов для алюминия 15 % и более, а для ПММА 30 % и более.

Время формирования и обработки пяти проекций не превосходит 2-3 минут, что свидетельствует о высокой производительности MathCad-программы, написанной на основе разработанной имитационной модели.

4.2. Артефакт рассеяния

Для проверки эффективности разработанной имитационной модели применительно к оценке артефакта рассеяния в КТ был проведен эксперимент по сканированию стального шара диаметром 33,3 мм. Эксперимент проводится на системе микро-КТ с коническим пучком. Система разработана в Томском политехническом университете и состоит из рентгеновского аппарата (Comet, Швейцария) с фокусным пятном 1 мм, 16-битного TFT-детектора (Perkin Elmer, США) и вращающегося стола. Радиационно-оптический преобразователь представляет собой экран из столбчатых кристаллов CsI. Эксперименты проводились для РИ с максимальной энергией E_{max} = 400 кэВ. Излучение фильтровали медной пластиной толщиной h_f = 4 мм.

На рис. 9 приведена 2D-проекция стального шара и результаты оценки радиального распределения ЛКО центрального сечения ОК. При моделировании был использован подход к оценке факторов накопления гамма-излучения из работы [55]. Предварительный анализ проекций показал наличие мощного источника вторичного фотонного излучения с неоднородным полем. Указанное поле фотонов формируется рассеянием излучения от элементов томографа и вспомогательных конструкций. С подобными сложностями в интерпретации артефактов в КТ сталкивались многие исследователи (например, [33]). В нашем случае присутствует аддитивная составляющая с ярко выраженной неоднородностью в центре. Отмеченное поле в первом приближении удалось представить в виде точеного изотропного источника излучения, ослабленного структурой с круглым сечением. Радиальное распределение интенсивности вторичного излучения выглядит аналогично распределению из работы [33]. Характеристики поля вторичного излучения оценивались методом невязки.

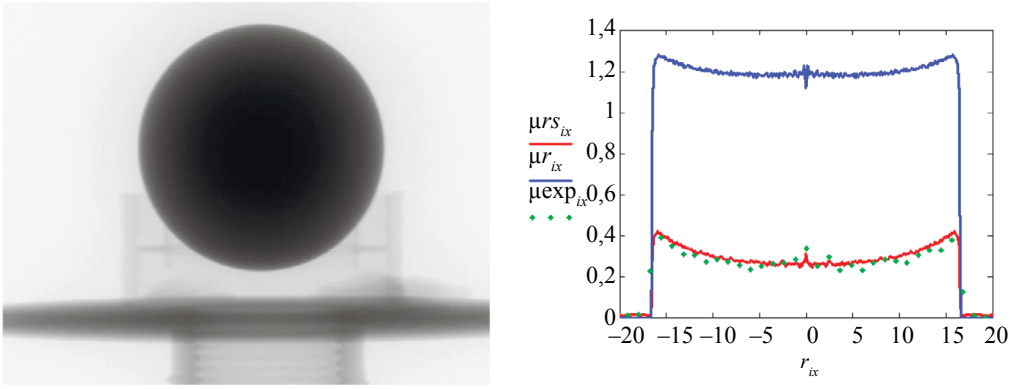

Рис. 9. 2D-проекция стального шара диаметром 33,3 мм и оценки радиальных распределений ЛКО для центрального горизонтального сечения:

— модельное без рассеянного излучения $\mu r(r)$; — модельное с рассеянным излучением $\mu rs(r)$; ♦ — экспериментальное.

Анализ приведенных графиков подтверждает вывод о необходимости компенсации артефакта рассеяния [33], причем необходимо учитывать все объекты рассеяния, а не только ОК. Близость модельных и экспериментальных радиальных зависимостей ЛКО свидетельствует об эффективности оценки артефакта рассеяния с помощью предложенной имитационной модели и соответствующей ей программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена имитационная модель оценки артефактов немоноэнергетичности и рассеяния в компьютерной томографии в геометрии параллельного пучка на примере неоднородных объектов с осевой симметрией. Алгоритм моделирования состоит из блока формирования проекций и блока реконструкции изображений сечений объекта на основе обратного преобразования Абеля. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на MathCad. Эффективность алгоритма и программы продемонстрирована на примере многослойного шара. Доказана адекватность предложенной модели путем сравнения модельных и экспериментальных оценок радиальных распределений линейного коэффициента ослабления излучения. Разработанные имитационные модели и программы позволяют осуществить корректный выбор параметров проектируемых систем рентгеновской

компьютерной томографии, а также могут быть использованы в учебном процессе в качестве блока виртуального томографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kak A.C.* Computerized tomography with X-ray, emission, and ultrasound sources // Proceedings of the IEEE. 1979. V. 67. No. 9. P. 1245—1272. https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11440

2. *Hsieh J.* Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA : SPIE, 2009.

3. *Sugawara H., Takayanagi T., Ishikawa T., Katada Y., Fukui R., Yamamoto Y., Suzuki S.* New fast kVp switching dual-energy CT: reduced severity of beam hardening artifacts and improved image quality in reduced-iodine virtual monochromatic imaging // Academic radiology. 2020. V. 27. No. 11. P. 1586—1593. https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.11.015

4. *Hur J., Kim D., Shin Y.G., Lee H.* Metal artifact reduction method based on a constrained beam-hardening estimator for polychromatic x-ray CT // Physics in Medicine & Biology. 2021. V. 66. No article 66. 065025. https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe026

5. *Stolfi A., De Chiffre L., Kasperl S.* Error sources // Industrial X-Ray Computed Tomography. Springer, Cham, 2018. P. 143—184. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_5

6. *Barrett J.F., Keat N.* Artifacts in CT: recognition and avoidance // Radiographics. 2004. V. 24. No. 6. P. 1679—1691. https://doi.org/10.1148/rg.246045065

7. *Alvarez R.E., Macovski A.* Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine & Biology. 1976. V. 21. No. 5. P. 733—744. https://doi.org/10.1088/0031-9155/21/5/002

8. *Kuchenbecker S., Faby S., Sawal S., Lell M., Kachelrieß M.* Dual energy CT: How well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? // Medical physics. 2015. V. 42. No. 2. P. 1023— 1036. https://doi.org/10.1118/1.4905106

9. *Li L., Chen Z., Wang G., Chu J., Gao H.* A tensor PRISM algorithm for multi-energy CT reconstruction and comparative studies // Journal of X-ray science and technology. 2014. V. 22. No. 2. P. 147—163. https://doi.org/10.3233/xst-140416

10. *Jacobsen M.C., Duan X., Cody D.D., Cressman E., Schellingerhout D., Layman R.R.* Determination of the limit of detection for iodinated contrast agents with multi-energy computed tomography // Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2018. V. 10573. No. article 105734Q. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2018SPIE10573E..4QJ/doi:10.1117/12.2293935

11. *Si-Mohamed S., Bar-Ness D., Sigovan M., Cormode D.P., Coulon P., Coche E., Vlassenbroek A., Normand G, Boussel L., Douek P.* Review of an initial experience with an experimental spectral photon-counting computed tomography system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2017. V. 873. P. 27—35. https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.04.014

12. *Raja A.Y., Moghiseh M., Bateman C.J., De Ruiter N., Schon B., Schleich N., Woodfield T.B.F., Butler Anthony P.H., Anderson N.G.* Measuring identification and quantification errors in spectral CT material decomposition // Applied Sciences. 2018. V. 8. No. 3. No. article 467. https://doi.org/10.3390/app8030467

13. *Abella M., Martínez C., Desco M., Vaquero J.J., Fessler J.A.* Simplified statistical image reconstruction for X-ray CT with beam-hardening artifact compensation // IEEE transactions on medical imaging. 2019. V. 39. No. 1. P. 111—118. https://doi.org/10.1109/TMI.2019.2921929

14. *Tang S., Huang K., Cheng Y., Mou X., Tang X.* Optimization based beam-hardening correction in CT under data integral invariant constraint // Physics in medicine and biology. 2018. V. 63. No. 13. No. article 135015. https://doi.org/10.1088/1361-6560/aaca14

15. *Runje B., Keran Z., Orošnjak M.* Image artefacts in industrial computed tomography // Tehnički glasnik. 2020. V. 14. No. 4. P. 434—439. https://doi.org/10.31803/tg-20200427122313

16. *Zbijewski W., Beekman F.J.* Efficient Monte Carlo based scatter artifact reduction in cone-beam micro-CT // IEEE transactions on medical imaging. 2006. V. 25. No. 7. P. 817—827. https://doi.org/10.1109/TMI.2006.872328

17. *Sabo-Napadensky I., Amir O.* Reduction of scattering artifact in multislice CT // Medical Imaging 2005: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2005. V. 5745. P. 983— 992. https://doi.org/10.1117/12.594885

18. *Nikolaev D., Buzmakov A., Chukalina M., Yakimchuk I., Gladkov A., Ingacheva A.* CT image quality assessment based on morphometric analysis of artifacts // 2016 International Conference on Robotics and Machine Vision. — International Society for Optics and Photonics, 2017. V. 10253. No. article 102530B. https://doi.org/10.1117/12.2266268

19. *Zav'yalkin F.M., Osipov S.P.* Effects of background radiation on image reconstruction error in computerized tomography // Soviet Atomic Energy. 1991. V. 70. No. 3. P. 228—231. https://doi.org/10.1007/BF01126472

20. *Park H.S., Choi J.K., Seo J.K.* Characterization of metal artifacts in X-ray computed tomography // Communications on Pure and Applied Mathematics. 2017. V. 70. No. 11. P. 2191—2217. https://doi.org/10.1002/cpa.21680

21. *Yue D., Fan Rong C., Ning C., Liang H., Ai Lian L., Ru Xin W., Ya Hong L.* Reduction of metal artifacts from unilateral hip arthroplasty on dual-energy CT with metal artifact reduction software // Acta Radiologica. 2018. V. 59. No. 7. P. 853—860. https://doi.org/10.1177%2F0284185117731475

22. *Hsieh J., Gurmen O.E., King K.F.* Investigation of a solid-state detector for advanced computed tomography // IEEE transactions on medical imaging. 2000. V. 19. No. 9. P. 930-940. https://doi.org/10.1109/42.887840

23. *Zefreh K. Z., Welford F. M., Sijbers J.* Investigation on the effect of exposure time on scintillator afterglow for ultra-fast tomography acquisition // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. No. 12. No. article C12014. https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/C12014

24. *Miller S.R., Bhandari H.B., Bhattacharya P., Brecher C., Crespi J., Couture A., Dinca C., Rommel M., Nagarkar V.V.* Reduced afterglow codoped CsI: Tl for high-energy imaging // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. V. 65. No. 8. P. 2105—2108. https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2807986

25. *Brönnimann C., Trüb P.* Hybrid pixel photon counting X-ray detectors for synchrotron radiation // Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers: Accelerator Physics, Instrumentation and Science Applications. 2020. P. 1191—1223. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14394-1_36

26. *Cammin J., Kappler S.G., Weidinger T., Taguchi K.* Evaluation of models of spectral distortions in photon-counting detectors for computed tomography // Journal of Medical Imaging. 2016. V. 3. No. 2. No. article 023503. https://doi.org/10.1117/1.JMI.3.2.023503

27. *Danielsson M., Persson M., Sjölin M.* Photon-counting x-ray detectors for CT // Physics in Medicine & Biology. 2021. V. 66. No. 3. No. article 03TR01. https://doi.org/10.1088/1361-6560/abc5a5

28. *Rathee S.D., Koles Z.J., Overton T.R.* Image restoration in computed tomography: Estimation of the spatially variant point spread function // IEEE transactions on medical imaging. 1992. V. 11. No. 4. P. 539—545. https://doi.org/10.1109/42.192689

29. *Wang W., Gang G.J., Siewerdsen J.H., Stayman J.W.* Spatial resolution and noise prediction in flat-panel cone-beam CT penalized-likelihood reconstruction // Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging. — International Society for Optics and Photonics, 2018. V. 10573. No. article 1057346. https://doi.org/10.1117/12.2294546

30. *Xu Y., Bai T., Yan H., Ouyang L., Pompos A., Wang J., Zhou L., Jiang S.B., Jia X.* A practical cone-beam CT scatter correction method with optimized Monte Carlo simulations for image-guided radiation therapy // Physics in Medicine & Biology. 2015. V. 60. No. 9. No. article 3567. https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/9/3567

31. *Busi M., Olsen U.L., Knudsen E.B., Frisvad J.R., Kehres J., Dreier E.S., Khalil M., Haldrup K.* Simulation tools for scattering corrections in spectrally resolved x-ray computed tomography using McXtrace // Optical Engineering. 2018. V. 57. No. 3. No. article 037105. https://doi.org/10.1117/1.OE.57.3.037105

32. *Thomsen M., Knudsen E.B., Willendrup P.K., Bech M., Willner M., Pfeiffer F., Poulsen M., Lefmann K., Feidenhans R.* Prediction of beam hardening artefacts in computed tomography using Monte Carlo simulations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. V. 342. P. 314—320. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.10.015

33. *Peterzol A., Létang J.M., Babot D.* A beam stop based correction procedure for high spatial frequency scatter in industrial cone-beam X-ray CT //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. V. 266. No. 18. P. 4042—4054. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.07.005

34. *Nakano T., Nakashima Y.* Analytical expressions for the reconstructed image of a homogeneous cylindrical sample exhibiting a beam hardening artifact in X-ray computed tomography // Journal of X-ray science and technology. 2018. V. 26. No. 5. P. 691—705. https://dx.doi.org/10.3233%2FXST-18378

35. *Osipov S.P., Yadrenkin I.G., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu., Manushkin A.A.* Calculation model of X-ray computed tomography with density assessment function // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 3. P. 222—237. https://doi.org/10.1134/S1061830921030049. [*Осипов С.П., Ядренкин И.Г., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю., Манушкин А.А.* Вычислительная модель рентгеновской компьютерной томографии с функцией оценки плотности // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 37—52.]

36. *Kramers H.A.* XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1923. V. 46. No. 275. P. 836—871. https://doi.org/10.1080/14786442308565244

37. *Zink F.E.* X-ray tubes // Radiographics. 1997. V. 17. No. 5. P. 1259—1268. https://doi.org/10.1148/radiographics.17.5.9308113

38. *Sasaya T., Sunaguchi N., Hyodo K., Zeniya T., Yuasa T.* Multi-pinhole fluorescent x-ray computed tomography for molecular imaging // Scientific reports. 2017. V. 7. No. 1. P. 1—12. https://doi.org/10.1038/s41598-017-05179-2

39. *Sidulenko O.A., Kas'yanov V.A., Kas'yanov S.V., Osipov S.P.* Estimated efficiency of slit collimation of a high-energy radiation source for radiometric testing of large objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. V. 42. No. 2. P. 101—105. https://doi.org/10.1134/S1061830906020057

40. *Benetskii B.A., Plotnikova M.V.* Gamma-radiation accumulation factors for composite materials and radiation shields // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2012. V. 39. No. 4. P. 113—117. https://doi.org/10.3103/S1068335612040045

41. *Osipov S.P., Prischepa I.A., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Usachev E.Yu.* Algorithms for modeling the formation and processing of information in X-ray tomography of foam materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 3. P. 238—250. https://doi.org/10.1134/S1061830921030050. [*Осипов С.П., Прищепа И.А., Чахлов С.В., Осипов О.С., Усачев Е.Ю.* Алгоритмы моделирования и обработки информации в рентгеновской томографии пеноматериалов // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 53—65.]

42. *Zhang T., Xing Y., Zhang L., Jin X., Gao H., Chen Z.* Stationary computed tomography with source and detector in linear symmetric geometry: Direct filtered backprojection reconstruction // Medical physics. 2020. V. 47. No. 5. P. 2222—2236. https://doi.org/10.1002/mp.14058

43. *Miqueles E., Koshev N., Helou E.S.* A backprojection slice theorem for tomographic reconstruction // IEEE Transactions on Image Processing. 2017. V. 27. No. 2. P. 894—906. https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2766785

44. *Brooks R.A., Di Chiro G.* Theory of image reconstruction in computed tomography // Radiology. 1975. V. 117. No. 3. C. 561—572. https://doi.org/10.1148/117.3.561

45. *Nishimura M., Psaltis D., Caimi F., Casasent D.* Implementation of the inverse Radon transform by optical convolution // Optics Communications. 1978. V. 25. No. 3. P. 301—304. https://doi.org/10.1016/0030-4018(78)90133-5

46. *Gustafsson B.* Mathematics for computer tomography // Physica Scripta. 1996. V. 1996. No. T61. P. 38—43. https://doi.org/10.1088/0031-8949/1996/T61/006

47. *Schofield R., King L., Tayal U., Castellano I., Stirrup J., Pontana F., Nicol E.* Image reconstruction: Part 1—understanding filtered back projection, noise and image acquisition // Journal of cardiovascular computed tomography. 2020. V. 14. No. 3. P. 219—225. https://doi.org/10.1016/j.jcct.2019.04.008

48. *Dolmatova A., Chukalina M., Nikolaev D.* Accelerated FBP for computed tomography image reconstruction // 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE. 2020. P. 3030—3034. https://doi.org/10.1109/ICIP40778.2020.9191044

49. *Shepp L.A., Logan B.F.* The Fourier reconstruction of a head section // IEEE Transactions on nuclear science. 1974. V. 21. No. 3. P. 21—43. https://doi.org/10.1109/TNS.1974.6499235

50. *Osipov S., Chakhlov S., Batranin A., Osipov O., Kytmanov J.* Theoretical study of a simplified implementation model of a dual-energy technique for computed tomography // NDT & E International. 2018. V. 98. P. 63—69. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.04.010

51. *Ametova E., Ferrucci M., Chilingaryan S., Dewulf W.* A computationally inexpensive model for estimating dimensional measurement uncertainty due to x-ray computed tomography instrument misalignments // Measurement Science and Technology. 2018. V. 29. No. 6. No. article 065007. https://doi.org/10.1088/1361-6501/aab1a1

52. *De Micheli E.* A fast algorithm for the inversion of Abel's transform // Applied Mathematics and Computation. 2017. V. 301. P. 12—24. https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.12.009

53. *Gholami M., Rashedi A., Lenoir N., Hautemayou D., Ovarlez G., Hormozi S.* Time-resolved 2D concentration maps in flowing suspensions using X-ray // Journal of Rheology. 2018. V. 62. No. 4. P. 955—974. https://doi.org/10.1122/1.4994063

54. *De Hoop M.V., Ilmavirta J.* Abel transforms with low regularity with applications to x-ray tomography on spherically symmetric manifolds // Inverse Problems. 2017. V. 33. No. 12. No. article 124003. https://doi.org/10.1088/1361-6420/aa9423

55. *Harima Y.* An approximation of gamma-ray buildup factors by modified geometrical progression // Nuclear Science and Engineering. 1983. V. 83. No. 2. P. 299—309. https://doi.org/10.13182/NSE83-A18222

УДК 620.179.15

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДЛЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПО ДАННЫМ ЯМР ^{19}F

© 2021 г. А.Ю. Гермов[1,*], К.Н. Михалёв [1], Р.В. Скорюнов[1], И.И. Мильман[1], Р.М. Абашев [1], А.И. Сюрдо[1], А.С. Снегирев[2], Е.Н. Агданцева[3]

[1]Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
Россия 249032 Обнинск, ул. Киевское шоссе, 109 км
[3]Уральский федеральный университет первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
[*]E-mail: germov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 15.04.2021; после доработки 10.06.2021
Принята к публикации 11.06.2021

Изучены спектры ЯМР ^{13}C, ^{19}F исходных и облученных образцов политетрафторэтилена в диапазоне доз гамма-излучения до 50 кГр. В этом диапазоне ширина спектра ЯМР ^{19}F возрастает линейно с ростом поглощенной дозы. Сделан вывод о возможности контроля технологических доз методом ЯМР с использованием в качестве детектора политетрафторэтилена.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, ПТФЭ, ядерный магнитный резонанс, доза облучения, ширина линии, дозиметрия, поглощенная доза, ЯМР ^{19}F, ЯМР ^{13}C, дозиметрический контроль.

DOI: 10.31857/S013030822107006X

ВВЕДЕНИЕ

Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР), основанного на поглощении радиочастотного электромагнитного поля ядрами веществ, имеющих в своем составе изотопы ядер с ненулевыми магнитными моментами (^{1}H, ^{13}C, ^{15}N, ^{31}P, ^{19}F, ^{29}Si и др.), помещенных в постоянное магнитное поле, нашло практическое применение в неразрушающем контроле качества материалов и изделий различного назначения. Основой применения методов ЯМР в неразрушающем контроле является высокая чувствительность к возмущениям магнитной ядерной подсистемы, вызванным химическим составом объекта контроля, наличием примесей, структурных дефектов, фазового состояния и др. Продвижению техники и методов спектроскопии ЯМР в область неразрушающего контроля во многом способствует появление как лабораторных образцов [1], так и выпускаемых серийно малогабаритных спектрометров ЯМР настольного типа для экспресс-контроля состояния различных сред [2, 3]. Ряд отечественных применений спектроскопии ЯМР для контроля качества продуктов питания, подлинности лекарственных средств, регламентируются нормативной базой [4, 5].

Современные тенденции неразрушающего контроля средствами спектроскопии ЯМР связаны с успехами в области разработок односторонних датчиков ЯМР для получения глубинных профилей с микроскопическим разрешением. Открытая геометрия таких датчиков «ЯМР-мышь» делает их мощным инструментом контроля характеристик объектов произвольного размера неразрушающим способом. Например, в концепции «открытых» датчиков ЯМР было создано устройство, опускаемое в буровую скважину на глубину до 10 км для обнаружения и изучения свойств жидкой фазы (нефти и воды), а также ЯМР-эндоскоп с внешним диаметром 1,7 мм для введения в крупные сосуды человека для диагностики [2, 6]. Несмотря на высокую чувствительность ЯМР к составу и свойствам некоторых органических соединений, имеются немногочисленные примеры применения этого метода в радиационной медицине. Основным из них является контроль пространственного распределения поглощенных доз в облучаемом объекте с помощью 2D-, 3D-изображений, дозовый контраст в которых формируется сигналом ЯМР [7]. Например, детекторами ЯМР покрывают всю поверхность объекта во время сеанса лучевой терапии и, одновременно, посредством магнитно-резонансной визуализации отслеживают получаемую дозу в реальном времени.

Тем не менее применение твердотельных ЯМР-детекторов в дозиметрии ионизирующих излучений в широком диапазоне доз и энергий остается до сих пор недостаточно изученным. Часто в качестве ЯМР-детекторов в медицинской дозиметрии используют растворы Фрике и полимерные

гели, а для получения собственно сигнала ЯМР — магнитное поле системы магнитно-резонансной визуализации. Вместе с тем, родственное с явлением ЯМР — электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) — широко применяется в высокодозной дозиметрии для контроля радиационных технологий стерилизации изделий медицинской техники, продуктов питания, при испытаниях радиационной стойкости материалов и изделий электронной техники и др. В этих применениях по ряду физически обоснованных причин [8, 9] в качестве детектора ЭПР применяется политетрафторэтилен (ПТФЭ). Этот материал содержит в своем составе ядра изотопа ^{19}F, естественное содержание которого составляет 100 %. Изотоп-зонд ^{19}F в ЯМР обладает очень высокой чувствительностью (гиромагнитное отношение $^{19}\gamma$ = 4,006 МГц/кЭ), что позволяет выявлять дефекты в атомном масштабе. Физические и химические процессы при радиационном воздействии на ПТФЭ изучались на предмет пригодности использования в космических технологиях [10—13]. При этом дозы облучения составляли от 0,5 МГр и выше.

Целью данной работы является изучение возможности проведения дозиметрического контроля методом ЯМР технологических операций, сопровождающихся высокодозным облучением, с последующей перспективой создания комбинированной ЯМР/ЭПР дозиметрической системы, обладающей повышенной надежностью, достоверностью, точностью результатов измерений.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ

Исследуемые образцы представляли собой пластинки ПТФЭ (Фторопласт-4) размером 3×10×1 мм^3. Они облучались гамма-излучением при комнатной температуре на установке ГУР-120 (ФГБНУ ВНИИРАЭ) с калиброванным радиационным полем. Установка является стационарной, используется для исследовательских целей и в ней применен сухой способ защиты. В установке имеется восемь блоков-облучателей, расположенных четыре напротив четырех и снаряженных источниками ГИК-7-4 на основе изотопа ^{60}Co с общей активностью $A = 4{,}47 \cdot 10^{15}$ Бк. Средняя мощность дозы в месте облучения образцов была 0,9 кГр/ч. Поглощенная доза у отдельных образцов составила 20, 30, 40 и 50 кГр. Образцы после облучения не подвергались никакой термообработке.

Для определения поглощенной дозы и контроля облучения использовались пленочные детекторы СО ПД(Ф)Р-5/50. Измерение оптической плотности пленок производилось на спектрофотометре ПЭ-5400УФ ЭКРОСХИМ. Погрешность измерения поглощенной дозы составляла не более ±7 %, при доверительной вероятности $P = 0{,}95$, стандарт №1735:2011 в Реестре МСО.

Регистрация сигналов ЯМР ^{19}F проводилась на импульсном ЯМР-спектрометре Bruker SXP4–100 методом спинового эха во внешнем магнитном поле H_0 = 17,094 кЭ с использованием импульсной последовательности $p(\pi/2)_x - \tau - p(\pi/2)_y$, где $p(\pi/2)$ = 8 мкс и τ = 60 мкс (в максимуме на релаксационном спаде), и временем цикла повторения t = 1 с. Для измерения ЯМР-сигнала (отклика) использовалась резонансная ячейка с зондом из кварцевого стекла, что исключало паразитные сигналы ^{19}F. Для получения качественных ЯМР-спектров число циклов повторения N было выбрано равным 128, что соответствовало времени регистрации каждого спектра около двух минут. Сдвиг линии ЯМР ^{19}F рассчитывали по линии эталона CF_3COOH δ = –76,55 ppm. Спектры ЯМР ^{13}C измерялись на импульсном ЯМР-спектрометре Bruker Avance II 500 во внешнем магнитном поле H_0 = 117,4768 кЭ с использованием импульсной последовательности $p(\pi/2)_x - \tau - p(\pi/2)_y$, где $p(\pi/2)$ = 2 мкс и τ = 30 мкс, и временем повторения t = 5 с при N = 12000. Все спектры измерены при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр ЯМР ^{19}F у исходного необлученного образца ПТФЭ имеет одну уширенную линию, представляющую собой суперпозицию нескольких неразрешенных линий (рис. 1*а*). Ее отрицательный химический сдвиг $\delta \approx -120$ ppm согласуется с известными данными и соответствует группам CF_2 [10—13]. В указанной суперпозиции можно выделить линию с δ = –190 ppm, которая, согласно [10—13], связана с группой CF, образующейся в результате пересечений в полимерной цепи. Из рис. 1*б* видно, что в облученных образцах с ростом поглощенной дозы от 0 до 50 кГр наблюдаемая линия уширяется, особенно в ее высокочастотной части. Из [10—13] следует, что такое существенное высокочастотное уширение является следствием появления групп CF_3, образующихся в результате радиационно-индуцированного разрыва полимерных цепочек CF_2 (вставка на рис. 1*а*). Незначительное смещение обсуждаемой линии в низкочастотной области при увеличении дозы облучения, по всей видимости, вызвано менее эффективным радиационным разрушением групп CF.

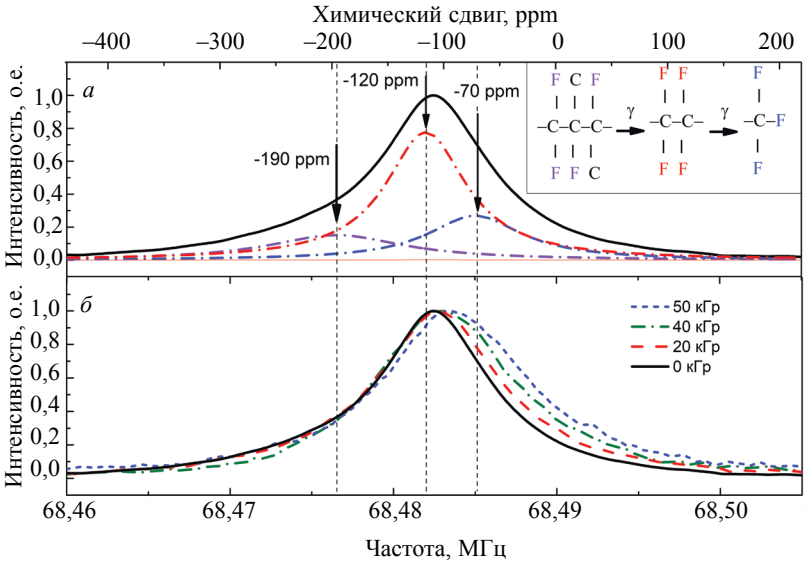

Рис. 1. Спектры ЯМР ^{19}F в образцах ПТФЭ, полученные при комнатной температуре во внешнем магнитном поле H=17.094 кЭ: *а* — спектр исходного необлученного образца (черная линия) и симуляция тремя линиями: группы CF (фиолетовый), CF_2 (красный), CF_3 (синий) обозначены штрихпунктирными линиями. На вставке приведены схематичные изображения соответствующих групп; *б* — спектры в образцах ПТФЭ с различной поглощенными дозами гамма-излучения: 0 кГр (черная жирная линия), 20 кГр (красная пунктирная линия), 40 кГр (зеленая штрихпунктирная линия), 50 кГр (синяя линия, короткий пунктир).

На рис. 2 показана дозовая зависимость ширины на половине высоты или полуширины обсуждаемой ЯМР-линии ^{19}F в облученных образцах ПТФЭ, а также ее аппроксимация линейной функцией. Как видно, она возрастает пропорционально поглощенной дозе. Важно отметить, что использованные дозы облучения являются недостаточными для образования значительного количества дефектов, приводящих к окислению с образованием групп OCF или OCF_2, COOH [10]. Такие группы, согласно [12, 14, 15], образуются в результате разрыва связей C—F и C—C, формируя алкильные радикалы в середине и в конце цепи. Эти радикалы могут реагировать с кислородом воздуха с образованием пероксирадикалов. Пероксирадикалы средней цепи превращаются в концевые группы COF и алкильные радикалы. Концевые группы COF частично гидролизуются до концевых групп COOH в результате реакции с водой, присутствующей в воздухе. Именно поэтому наблюдаемое уширение спектра ^{19}F не столь значительно. Несмотря на это, наблюдаемый рост ширины линии ^{19}F (до 25 %) при достаточно малом времени получения сигнала ~128 с позволяет использовать эту методику для быстрого определения поглощенных доз. Более того, известные [10—13] и полученные данные свидетельствуют о том, что, используя ЯМР-отклик от изотопа ^{19}F

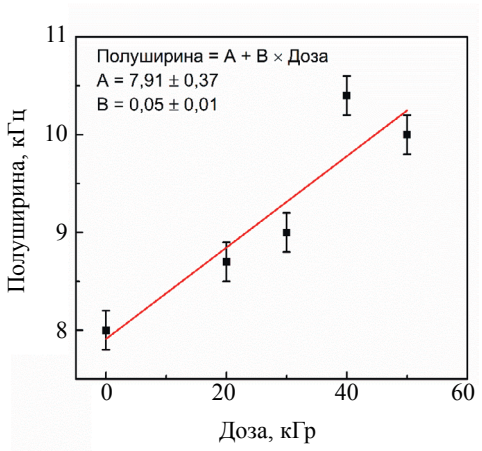

Рис. 2. Зависимость ширины линии на половине высоты ЯМР ^{19}F от поглощенной дозы в образцах ПТФЭ.

в облученном ПТФЭ, можно измерять дозы облучения гамма- и фотонным ионизирующим излучением в диапазоне доз облучения от 10^4 до 10^6 Гр.

Оценки времен спин-спиновой и спин-решеточной релаксации ^{19}F составили T_2 = 50 мкс и T_1 = 240 мс соответственно для всех образцов вне зависимости от поглощенной дозы. По всей видимости, поглощенные дозы слишком малы для значительного изменения релаксационных характеристик. Релаксационные кривые T_1 и T_2 хорошо описываются одной экспонентой. Это, вероятно, связано с тем, что при примененных дозах облучения (до 50 кГр) механизмы релаксации одни и те же для всех неэквивалентных позиций атомов фтора.

Вышеупомянутые типы возникающих дефектов в ПТФЭ влияют на ближайшее окружение атомов углерода, а использование дополнительного ядра-зонда ^{13}C, несмотря на более низкую чувствительность ($^{13}\gamma$ = 1,071 МГц/кЭ), может повысить достоверность результатов. На рис. 3 приведены спектры ЯМР ^{13}C для тех же образцов. Каждый спектр включает несколько неразрешенных линий, в числе которых группы CF_3 (δ = 118 ppm), группы CF_2 (δ = 111 ppm), а основную часть составляют группы CF (δ = 103 ppm) [12, 13, 16]. Из рис. 3 следует, что с ростом дозы облучения до 50 кГр форма линии ЯМР ^{13}C не видоизменяется, включая ее ширину на половине высоты. Наблюдаемая картина, наиболее вероятно, связана с малым отличием в сдвигах ЯМР ^{13}C и небольшим изменением в соотношении групп CF, CF_2, CF_3 при примененных дозах облучения. В [10] приведены количественные оценки вкладов групп CF_2 и CF_3 в формировании спектра ЯМР ^{13}C в зависимости от поглощенных доз. В частности, в [10] показано, что заметное увеличение радиационных дефектов, приводящих к заметным изменениям спектров ЯМР ^{13}C, достигается при дозах не менее 0,5 МГр.

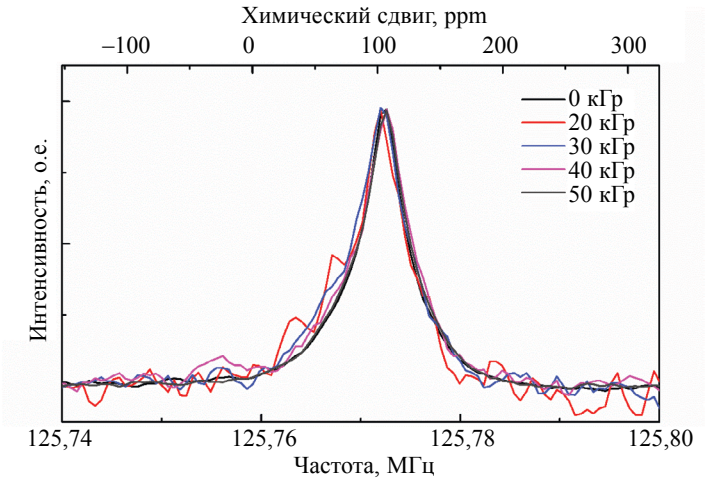

Рис. 3. Спектры ЯМР ^{13}C в образцах ПТФЭ с различной поглощенной дозой гамма-излучения, полученные при комнатной температуре.

Недостаточное разрешение спектров ЯМР ^{13}C не позволяет точно анализировать перераспределение конфигураций CF, CF_2, CF_3, поэтому регистрация спектров ЯМР ^{13}C оказывается малоинформативной. Применение ЯМР ^{13}C высокого разрешения с вращением под магическим углом доступно только для веществ в порошкообразном виде. Получение порошков в данном случае приведет к неоднозначности причин возникновения дефектов: механические или радиационные. Использование ЯМР ^{13}C для имеющихся детекторов может оказаться перспективным при использовании более высоких магнитных полей и доз облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В образцах политетрафторэтилена, облученных гамма-излучением в диапазоне доз от 0 до 50 кГр, изучены при комнатной температуре спектры ЯМР ^{19}F и ^{13}C. Получено, что ширина линии ЯМР ^{19}F линейно возрастает при увеличении дозы облучения до 50 кГр. Для облученного ПТФЭ, указанный результат может быть использован не только самостоятельно, но и для создания комбинированной методики и системы детекторов на основе ЯМР/ЭПР методов для проведения технологического дозиметрического контроля.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы «Функция» № АААА-А19-119012990095-0 и «Экспертиза» № АААА-А19-119062590007-2) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-48-660045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов В.В., Мязин Н.С., Давыдова Т.И.* Неразрушающий метод экспресс – контроля конденсированных сред для экологического мониторинга // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 52—61.

2. *Blumich B., Casanova F., Dabrowski M., Danieli E., Evertz L., Haber A., Van Landeghem M.V., Haber-Pohlmeier S., Olaru A., Perlo J., Sucre O.* Small-scale instrumentation for nuclear magnetic resonance of porous media // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 015003. DOI: 10.1088/1367-2630/13/1/015003

3. *Kleinberg R.L., Sezginer A., Griffin D.D., Fukuhara M.* Novel NMR apparatus for investigating an external sample // J. Magn. Reson. 1992. V. 97. I. 3. P. 466—485. DOI: 10.1016/0022-2364(92)90028-6

4. ГОСТ 8.597—2010. Семена масличных культур и продукты их переработки Методика измерения масличности и влажности методом импульсного ядерного магнитного резонанса. М.: Стандартинформ, 2019.

5. ОФС.1.2.1.1.0007.15. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса. Государственная фармакопея Российской Федерации. XIII издание. Т. 1. 2015.

6. *Blümich B., Perlo J., Casanova F.* Mobile single-sided NMR // Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc. 2008. V. 52. I. 4. P. 197—269. DOI: 10.1016/j.pnmrs.2007.10.002

7. *Улеманн Ф.* Дозиметр, терапевтический аппарат и компьютерный программный продукт для измерения дозы облучения субъекта во время магнитно-резонансной визуализации / Патент РФ на изобретение № 2594431 от 20.08.2016. Бюл. № 23.

8. *Mil'man I.I., Surdo A.I., Abashev R.M.* et al. Polytetrafluorethylene in High-Dose EPR Dosimetry for Monitoring Radiation Technologies // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 11. P. 868—874. [*Мильман И.И., Сюрдо А.И., Абашев Р.М., Цмокалюк А.Н., Берденев Н.Е., Агданцева Е.Н., Попова М.А.* Политетрафторэтилен в высокодозной ЭПР дозиметрии для контроля радиационных технологий // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 52—58. DOI: 10.1134/S0130308219110016X]

9. *Vehar D.W., Griffin P.J., Quirk T.J.* EPR/PTFE dosimetry for test reactor environments // J. ASTM Int. 2012. V. 9. I. 5. P. 1—11. DOI: 10.1520/JAI104051

10. *Lappan U., Fuchs B., Geißler U., Scheler U., Lunkwitz K.* Number-average molecular weight of radiation-degraded poly(tetrafluoroethylene). An end group analysis based on solid-state NMR and IR spectroscopy // Polymer. 2002. V. 43. I. 16. P. 4325—4330. DOI: 10.1016/S0032-3861(02)00294-X

11. *Katoh E., Sugisawa H., Oshima A., Tabata Y., Seguchi T., Yamazaki T.* Evidence for radiation induced crosslinking in polytetrafluoroethylene by means of high-resolution solid-state ^{19}F high-speed MAS NMR // Radiat. Phys. Chem. 1999. V. 54. I. 2. P. 165—171. DOI: 10.1016/S0969-806X(98)00250-3

12.*Chen Q.* Solid-state NMR investigations of a perfluorinated ionomer: Nafion. Digital Repository @ Iowa State University, 2005. 179 p. DOI: 10.31274/rtd-180813-11684

13. *Desilva J.H.S.R., Vazquez R., Stallworth P.E., Reddy T.B., Lehnes J.M., Guo R., Gan H., Muffoletto B.C., Greenbaum S.G.* Solid-state nuclear magnetic resonance studies of electrochemically discharged CF_x // J. Power Sources. 2011. V. 196. I. 13. P. 5659—5666. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.02.036

14. *Lunkwitz K., Brink H-J., Handte D., Ferse A.* The radiation degradation of polytetrafluoroethylene resulting in low-molecular and functionalized perfluorinated compounds // Radiat. Phys. Chem. 1989. V. 33. I. 6. P. 523—532. DOI: 10.1016/1359-0197(89)90309-3

15. *Lunkwitz K., Bürger W., Lappan U., Brink H-J., Ferse A.* Surface modification of fluoropolymers // J. Adhes. Sci. Technol. 1995. V. 9. I. 3. P. 297—310. DOI: 10.1163/156856195X00518

16. *Liu S.-F., Schmidt-Rohr K.* High-Resolution Solid-State ^{13}C NMR of Fluoropolymers // Macromolecules. 2001. V. 34. I. 24. P. 8416—8418. DOI: 10.1021/ma0113576

УДК 620.179.13

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИК-ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ

© 2021 г. П. Багавач[1,*], Л. Крстулович-Опара[1], Ж. Домазет[1]

[1] *Сплитский университет, ФЭМС, ул. Р. Бошковича, 32, Хорватия,*
[*]*E-mail: petra.bagavac@fesb.hr*

Поступила в редакцию 16.02.2021; после доработки 08.03.2021
Принята к публикации 23.04.2021

Представлен новый метод разделения подповерхностных дефектов в отвержденных предварительно пропитанных образцах полимера, армированного углеродным волокном (углепластика), на тепловых изображениях, основанный на выделении границ. Исходные данные инфракрасной термографии на отражение каждого образца обрабатывались с помощью нескольких алгоритмов: восстановление теплового сигнала, быстрое преобразование Фурье и анализ главных компонент. Изображения были обработаны для определения поврежденных и неповрежденных участков. Алгоритм определения области несплошности основан на методах выделения границ. Выделение границ позволяет обнаруживать как смоделированные повреждения, так и границы между образцом и фоном на тепловом изображении. В предлагаемом алгоритме границы находятся посредством фильтра Собеля. Границы определяются как переходная зона между поврежденным и неповрежденным материалами. В данной статье алгоритм выделения границ используется как помощник при принятии решения в неразрушающем контроле.

Ключевые слова: фильтрация данных, выделение границ, инфракрасная термография, пропитанные пластины композита из углепластика.

DOI: 10.31857/S0130308221070071

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия все большее внимание уделяется инфракрасному неразрушающему контролю. Основные причины — технологические достижения, в результате которых ИК-камеры имеют более высокую скорость сбора данных, более высокое разрешение и более высокую чувствительность. Инфракрасные камеры используются в пассивной и активной термографии. Пассивная термография чаще всего применяется в медицине, в строительстве (потеря тепла, воздухообмен, определение влажности), на электростанциях (трансформаторы, распределительные устройства, распределение электроэнергии), при обследовании поверхностей, нагруженных трением (двигатели, трансмиссии, другие поверхности трения), обследование резервуаров, трубопроводов и изоляции, в военных целях для наблюдения, спасения, наблюдения за пожарами, археологических раскопок и многого другого [1—3]. А активную термографию — чаще всего для определения свойств материалов, коррозии, неоднородностей в структуре материалов или для обнаружения поврежденных участков [4—6]. В активной инфракрасной термографии задействуют внешние источники тепла, обычно это оптическое возбуждение. Нагрев интересующего объекта осуществляется галогенными лампами, вспышками или лазером. Такие установки широко используются в технологии контроля металлических листов [7, 8] и композитных конструкций [9, 10]. Полученные тепловизионные изображения содержат информацию о внутренней структуре исследуемой поверхности. Подповерхностные нарушения сплошности влияют на скорость диффузии тепла, что приводит к тепловому контрасту на поверхности образца [10]. Собранные данные обычно обрабатываются известными методами обработки тепловизионных изображений: восстановление теплового сигнала, введенная Шепардом [11—15], быстрое преобразование Фурье, которое использовал C. Ibarra-Castanedo [10, 16], и анализ главных компонент, предложенный N. Rajić [17—20]. В последнее время выделение границ дефектов играет важную роль в инфракрасном контроле [21, 22]. Для каждого образца выбирается лучшее изображение, и оно обрабатывается с помощью алгоритма выделения границ. Выделение границ по Собелу, Кэнни, Робертсу, Превитту или лапласиану Гаусса обычно используются в медицинских целях [23—25] или для обнаружения интересующих объектов на фотографиях [26].

В этой статье представлен новый метод разделения подповерхностных дефектов в отвержденных образцах из предварительно пропитанного углепластика на тепловых изображениях, основанный на выделении границ. Предварительно пропитанный углепластик — это термин для предварительно пропитанных композитных волокон, в которых матричный материал, такой как эпоксидная смола, уже введен в волокнистую матрицу таким образом, что он готов к применению, что

Рис. 1. Сборочная линия в автомобилестроении.

упрощает и ускоряет процесс производства. Предварительно пропитанный углепластик позволяет пропитывать волокна на плоской обрабатываемой поверхности или даже в промышленном процессе, а затем придавать пропитанным волокнам такую форму, которую сложно получить при обычных производственных процессов, таких как, например, в методе горячего впрыска. В последнее время наблюдается значительный интерес к предварительно пропитанному углепластику для автомобильных приложений, что подразумевает значительный запрос на неразрушающий контроль изготавливаемых деталей [27—29]. Это исследование связано с проектом, финансируемым автомобильной промышленностью. Образцы имеют одинаковую форму, одинаковое количество слоев и одинаковую ориентацию слоев. Отверждение образцов осуществляется в тех же условиях, что и для автомобильного шасси на производственной линии автомобильного завода. Общей проблемой при производстве является то, что слои материала не отверждаются полностью. При этом образуется слой сухого материала без смолы. В этой статье такая ситуация моделируется тефлоновыми вставками, поскольку тефлон препятствует отверждению слоев. Используются однослойные тефлоновые вставки. Тефлон достаточно тонкий, поэтому он не оказывает существенного влияния на поток тепла через материал [27] и не оказывает большего влияния на тепловое изображение в сравнении с воздушной полостью. Другая проблема — процесс отверждения на краях армирования, например, алюминиевых пластин, используемых в качестве опор для винтов. Между слоями углерода помещены армирующие алюминиевые пластины. Проблема возникает из-за резкого изменения толщины материала. После отверждения пространство между слоями не полностью заполняется смолой, и на этих переходах образуются полости. Эти полости представляют собой опасность при дальнейшей эксплуатации, поскольку они представляют собой трещину/расслоение в области сосредоточенной нагрузки. Это было смоделировано с помощью пластинчатой вставки Coremat®, в которой просверлено отверстие для резкого изменения толщины материала. На рис. 1 показано шасси автомобиля с винтовыми опорами на производственной линии.

2. МЕТОДЫ

В этом параграфе представлен краткий обзор методов, которые будут использоваться для последующей обработки тепловизионных изображений. Метод восстановления термографического сигнала была запатентован в США М. Шепардом [11—13] в 2013 г. Преимущества метода заключаются в сокращении количества данных, устранении шума, сглаживании кривой для того, чтобы она стала дифференцируемой. Основное предположение метода заключается в том, что кривая охлаждения пикселя будет соответствовать одномерному решению уравнения теплопроводности в логарифмическом представлении:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t), \tag{1}$$

где Q — энергия, передаваемая в виде тепла; а t — прошедшее время.

Уравнение (1) справедливо только для полубесконечного тела, когда тепло от полубесконечного тела не передается его окружению. В [3] было показано, что для нескольких первых тепловых

изображений процесс охлаждения следует этому уравнению даже для конечных тел. Шепард предложил [1—3], что термографические данные должны быть записаны как полином m-й степени, полученный путем подбора исходного набора данных:

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + \cdots + a_m \ln^m(t). \quad (2)$$

Пиксели термограммы неповрежденной области будут следовать этому решению, в то время как пиксели поврежденной области будут отклоняться от предложенного решения. Оптимизация степени полинома обсуждалась в предыдущих исследованиях [14, 15]. В данной статье используется многочлен пятой степени. Более высокие степени полиномов не привнесли существенных изменений в обнаруживаемости вставок, а уровень шума увеличивался с увеличением степени полинома. Кроме того, в литературе показано, что нечетные степени многочленов находят большее применение в задачах неразрушающего контроля [14, 15].

Сглаженные данные подвергались быстрому преобразованию Фурье (БПФ). БПФ передает данные из временной области в частотную [30, 31]:

$$F_n = \sum_{n=1}^{N} T(k) e^{\left(\frac{2\pi jkn}{N}\right)} = \mathrm{Re}_n + \mathrm{Im}_n, \quad (3)$$

где j — мнимая единица ($j^2 = -1$); n — увеличение частоты ($n = 0,1, \ldots, N$); N — общее количество тепловизионных изображений; Re и Im — действительная и мнимая части преобразования, из которого можно вычислить амплитуду сигнала A и фазу сигнала φ [30, 31]:

$$A_n = \sqrt{\mathrm{Re}_n^2 + \mathrm{Im}_n^2} \text{ и } \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}_n}{\mathrm{Re}_n}\right). \quad (4)$$

Этот метод последовательно сортирует данные по возрастанию частот. Метод БПФ в первую очередь предназначен для обработки периодических повторяющихся сигналов [30]. Поскольку кривая охлаждения является сигналом переходного процесса, необходимо соблюдать особые меры предосторожности при выборе частоты дискретизации и объема данных для обработки, которые напрямую связаны с интервалом времени дискретизации. Для проведения соответствующего отбора данных необходимо выбрать значения двух из этих трех параметров $w(t) = N\Delta t$, где $w(t)$ — это временной интервал; N — общее количество обработанных тепловизионных изображений и $\Delta t = 1/f_s$, а f_s — частота дискретизации. Параметры, выбранные во временной области, напрямую влияют на параметры в частотной области, так что минимальная частота разрешения в частотной области определяется как

$$f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{N} f_s. \quad (5)$$

Максимальная частота частотной области будет определена как $f_{\max} = f_s/2$, что известно как частота Найквиста [30]. Более низкие частоты содержат более ценную информацию, а более высокие частоты загрязнены шумом [16, 30]. Поэтому более низкие частоты представляют особый интерес в области ИК-термографии. Желательно выбрать более длительный интервал времени измерения или более высокую частоту дискретизации. Возможности оборудования, такие как максимальная скорость сбора данных, часто являются ограничивающим фактором при выборе значений этих параметров.

Метод БПФ сравнивается с методом термографии главных компонент (ТГК). Метод ТГК очень похож на анализ главных компонент (АГК), с той разницей, что для ТГК сингулярное разложение осуществляется одновременно как по строкам, так и по столбцам [17]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{URV}^T, \quad (6)$$

где $\mathbf{U}$ — ортогональная матрица (представляющая набор эмпирических ортогональных функций — ЭОФ) $M \times N$, $\mathbf{R}$ — диагональная матрица $N \times N$, а $\mathbf{V}^T$ — транспонированная матрица $N \times N$.

3. МАТЕРИАЛЫ

Были проконтролированы три предварительно пропитанных образца углепластика с размерами 150×150 мм, представленные на рис. 2. Образец CFRP-T001 состоял из четырех слоев предварительно пропитанных углеродных волокон, дефекты в котором моделировались с помощью тефлоновых вста-

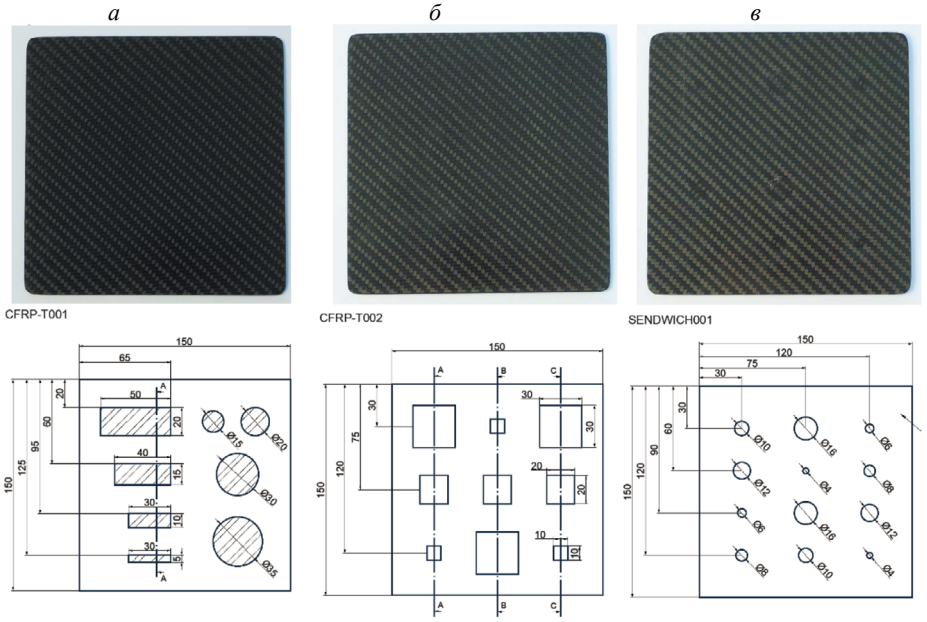

Рис. 2. Образца углепластика: CFRP-T001 (*а*); CFRP-T002 (*б*); SENDWICH001 (*в*).

вок, имеющих различную геометрию (форму и площадь) и расположенных на одной и той же глубине, что показано на рис. 2*а*. Толщина образца CFRP-T001 составляла 1,9 мм. Тефлоновые вставки имеют квадратную или круглую форму толщиной 0,08 мм каждая. После второго слоя углеродного волокна, расположенного на глубине примерно 1 мм, закладывались тефлоновые вставки. Образец CFRP-T002 состоял из шести слоев, и дефекты были смоделированы тоже в виде тефлоновых вставок с разной геометрией (одинаковой формы, но разной площади) на разной глубине, как показано на рис. 2*б*. Толщина образца CFRP-T002 составила 2,8 мм. Тефлоновые вставки имели квадратную форму толщиной 0,08 мм каждая. Размеры тефлоновых вставок 30×30, 20×20 и 10×10 мм. После первого, третьего и пятого слоя углепластика укладывались тефлоновые вставки, расположеные на глубине 2,3 мм (поперечное сечение А, левый столбец), 1,4 мм (сечение В, средний столбец) и 0,5 мм (сечение С, правый столбец) соответственно. Образец SENDWICH001 представляет собой многослойный композитный материал, в котором Coremat® был проставлен между четырьмя слоями углепластика, как показано на рис. 2*в*. Толщина слоя Coremat® составляет 1,5 мм, а общая толщина образца составляет 3,5 мм. Coremat® — это нетканый материал на основе полиэфирных волокон. Он используется в качестве сердцевины для увеличения жесткости без значительного увеличения веса в слоистых материалах, армированных волокном. Coremat® всегда должен быть полностью пропитан смолой. Наиболее важными причинами использования Coremat® являются: отношение веса к жесткости и быстрое наращивание толщины, что увеличивает грузоподъемность без увеличения массы. В образце SENDWICH001 Coremat® изначально просверливались отверстия разного диаметра от 4 до 16 мм. Большинство вставок, встроенных в сэндвич-структуру, видны невооруженным глазом на лицевой стороне образца, как показано на рис. 2*в*. Этот эффект объясняется различной шероховатостью поверхности и тем, что передняя поверхность слегка вогнута из-за усадки материала в процессе отверждения. Процедура контроля проводилась с помощью инфракрасной камеры, обращенной к задней поверхности образца. Задняя поверхность однородная, без отклонений и шероховатостей, поэтому результаты контроля из-за этого не становятся хуже. Все проконтролированные образцы были изготовлены из предварительно пропитанных углеродных волокон RAW006-010319 SHD DF314-C650-HS-3K-1250 мм, выдержанных 18 ч в автоклаве MAROBO® при 75 ºС и давлении 1,5 бар.

Образцы контролировались термографией на отражение. Экспериментальная установка включала в себя инфракрасную камеру FLIR 5000SC, с частотой сбора данных 25 кадров в с, фотовспышку TRIA PRO и импульсный генератор HENSEL, излучающий 6000 Дж за 1/440 с, как показано рис. 3*а*. По записанной последовательности тепловых изображений наблюдался временной интервал 10,24 с. Общее количество обработанных тепловизионных изображений для каждого образца составило 256. На рис. 3*б* показана нормализованная кривая спада температуры для случайного пикселя образца CFRP-T001.

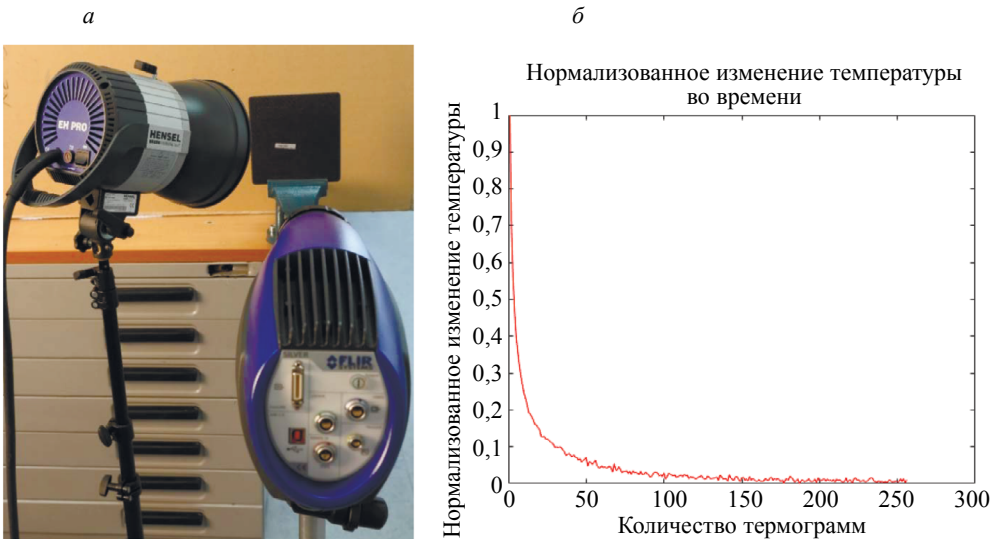

Рис. 3. Экспериментальная установка (*а*); нормализованная кривая изменения температуры во времени (*б*).

На рис. 4. представлены первичные тепловые изображения каждого образца с максимальным контрастом. Неоднородности было трудно обнаружить на первичных изображениях, поскольку многочисленные воздействия окружающей среды влияли на тепловой поток от образца к ИК-камере. Этикетка на образце в виде наклейки была приклеена к центральной части образца при производстве и сильно влияла на способность к обнаружению дефектов. Рекомендуется ничего не наклеивать на образцы вообще или, при необходимости, наклеивать на те участки, которые не будут контролироваться тепловой методом НК. То же самое происходит после процедуры удаления перманентного маркера; это также имеет влияние на тепловые изображения.

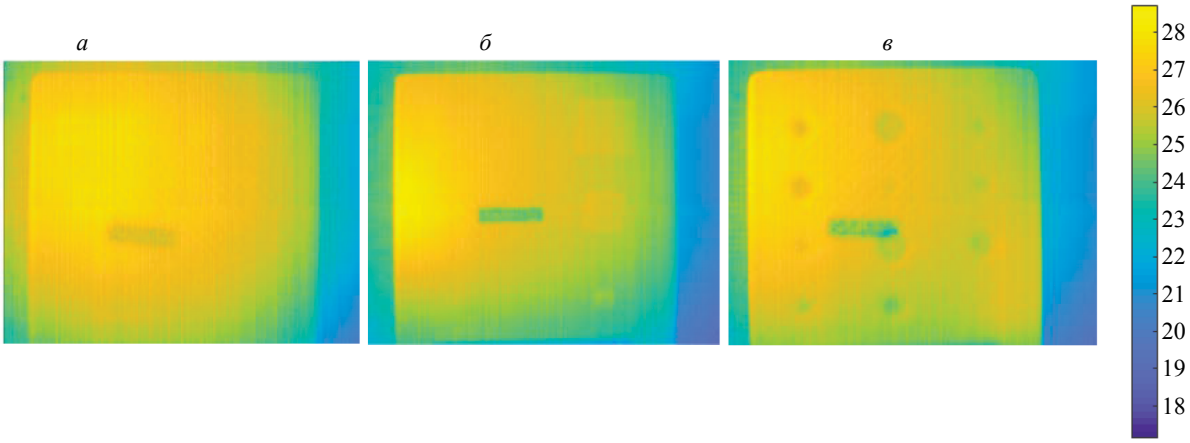

Рис. 4. Первичные термограммы: CFRP-T001 (*а*); CFRP-T002(*б*); SENDWICH001 (*в*).

4. ПОСТОБРАБОТКА ПЕРВИЧНЫХ ТЕРМОГРАММ

Первичные изображения были обработаны с использованием метода восстановления теплового сигнала (ВТС), в котором данные сглаживаются для удаления шума. Для первичных данных был подобран полином пятой степени, поэтому было рассмотрено шесть коэффициентов (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 и a_6), которые будут характеризовать изображение. Отношение сигнал/шум (ОСШ) рассчитывалось для каждого такого коэффициента. Самое оптимальное ОСШ было получено для коэффициента a_2. Выбранное изображение показано на рис. 5, столбец 1. Дальнейшая обработка проводи-

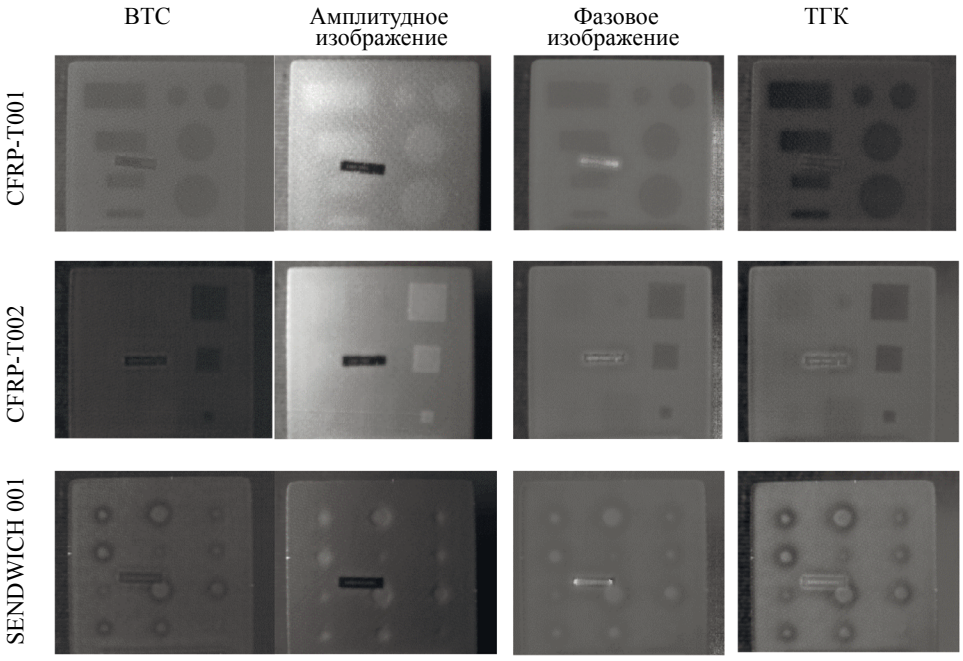

Рис. 5. Термограммы после обработки методами ВТС, БПФ (амплитудное и фазовое) ТГК (ЭОФ$_2$).

лась на данных моделирования. Вместо исходных необработанных данных использовались данные, полученные при расчете коэффициентов полинома 5-й степени. Все участки с тефлоновыми вставками видны на образце CFRP-T001, независимо от размера или формы вставки. На образце CFRP-T002 видны все вставки на глубине 0,5 мм, независимо от их размера. На большей глубине не видны участки ни с большей, ни меньшей площадью поверхности. На образце SENDWICH001 не были обнаружены только дефектные участки наименьшего диаметра (∅4 мм). На этом образце самый большой контраст имеется как раз на границе дефектного участка. Это можно объяснить тем, что перфорированные отверстия были заполнены смолой, и смола имеет примерно такие же тепловые свойства, что и материал образца. Амплитудное изображение и фазовое изображение после применения алгоритма БПФ к данным ВТС представлены на рис. 5 (столбец 2 и столбец 3). Оба изображения были выбраны из набора полученных результатов на частоте 0,1953 Гц. Показано большое влияние неравномерного нагрева на амплитудное изображение (см. рис. 5, столбец 2), в то время как фазовые изображения (см. рис. 5, столбец 3) оказались весьма успешными в выявлении смоделированных неоднородностей. В последнем столбце на рис. 5 показаны результаты после применения метода ТГК к данным ВТС. Представленный результат — эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ$_2$) показан на рис. 5, столбец 4. На изображениях четко видны края вставок и смоделированный поврежденный участок. Результаты ясны из-за воздействия окружающей среды, а шум устранен. На представленных образцах все моделируемые повреждения выявлены методом ТГК. Дальнейшая обработка будет выполняться на тепловых изображениях, подвергнутых последующей обработке методом ТГК, поскольку при этом достигается наибольшая контрастность (см. рис. 5, столбец 4). В следующем разделе представлены результаты ТГК, которые обрабатываются алгоритмом выделения границ.

5. АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ

Анализ изображений после обработки предоставляется оператору, который должен оценить, вызвана ли разница в интенсивности цвета поверхности дефектом или ухудшением сигнала. Предлагаемый алгоритм выделения границ — это инструмент помощи в принятии решений в неразрушающем контроле. Этот алгоритм был задуман как инструмент проверки по принципу «годен/не годен», который упрощает анализ изображений. Выделение границ позволяет обнаруживать как контуры, так и границы между образцом и фоном на тепловом изображении. Есть несколько типов методов выделения границ. Чаще всего используются методы Собеля, Робертса, Превитта, лапла-

сиан Гаусса (LoG) и алгоритм Кэнни [23, 24, 34]. Выделение границ основано на фильтре Собеля и состоит из нескольких шагов, как показано на рис. 6. Алгоритм применяется к одному изображению за другим. Цветовую палитру изображения необходимо переводить в оттенки серого. На первом этапе алгоритм подчеркивает края с помощью фильтра Собеля. Порог чувствительности для метода Собеля выбирается вручную. Таким образом, алгоритм игнорирует все ребра ниже установленного значения для порога. Оператор Собеля использует два ядра 3×3, которые свернуты с исходным изображением. Первое ядро применяет функцию градиента к столбцам, а второе — к строкам в матрице изображения [32, 33]:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad \text{и} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times A. \tag{7}$$

В каждой точке изображения величину градиента можно рассчитать как

$$G = \sqrt{G_x^{\,2} + G_y^{\,2}}\,. \tag{8}$$

Обычно границы определяются как переходные зоны между дефектным и неповрежденным материалом.

Границы обрабатываются математически и формируются в виде замкнутых кривых со сплошной внутренней областью. Кривые определяют границу сплошной закрашенной области. Сплошная область в этом случае считается дефектной. На исследуемой поверхности образца может быть более одного дефектного участка. В предлагаемом методе каждый такой участок можно рассматривать отдельно. Для лучшего отображения различные поврежденные участки окрашены в разные цвета. Алгоритм распознавал поврежденные области, но также отмечал некоторые другие области как дефекты, которые, на самом деле, не были таковыми. Это были, например, части изображения с плохими пикселями, поверхностей с другими коэффициентами излучения или поверхности с иной обработкой поверхности. Были обследованы все участки, обозначенные как поврежденные. Области, размеры которых меньше установленного порогового значения, не принимались во внимание. В зависимости от требований можно настроить чувствительность, выбрав соответствующее пороговое значение. Этот подход может использоваться для участков, являющихся следствием шума, или участков, слишком маленьких, чтобы их можно было рассматривать в качестве дефекта. Размер таких областей можно связать с конкретным критерием приемлемости и пренебречь, если критерий не нарушен. На последнем этапе удаляется фон, чтобы можно было рассчитать площадь повреждения. Предлагаемый алгоритм выделения границ показан на рис. 6.

Рис. 6. Предложенный алгоритм выделения границ.

Алгоритм выделения границ успешно использован для изображений, показанных на рис. 5. В этом исследовании будут представлены изображения из последнего столбца на рис. 5 (ТГК), как описано в пункте 4. Результаты выделения границ показаны на рис. 7. В первом столбце рис. 7 показаны термограммы после применения ТГК-метода. Во втором столбце показаны результаты алгоритма выделения границ. По этим изображениям определяют границу между дефектной и бездефектной областью. Каждая поврежденная область распознавалась алгоритмом как отдельный объект и окрашивалась по-разному. Дефектные участки были должным образом отделены от неповрежденных участков, так что все границы представляли собой замкнутые кривые. Алгоритм также распознал фон образца для его последующего исключения. В последнем столбце участки, признанные дефектными, перекрываются исходным тепловым изображением из первого столбца. Алгоритм в большей степени обнаруживает поврежденные участки. Большинство дефектов в виде ставок были обнаружено, в то время как их меньшее количество осталось необнаруженным, в основном из-за геометрических характеристик тефлоновых вставок и глубины, на которой они

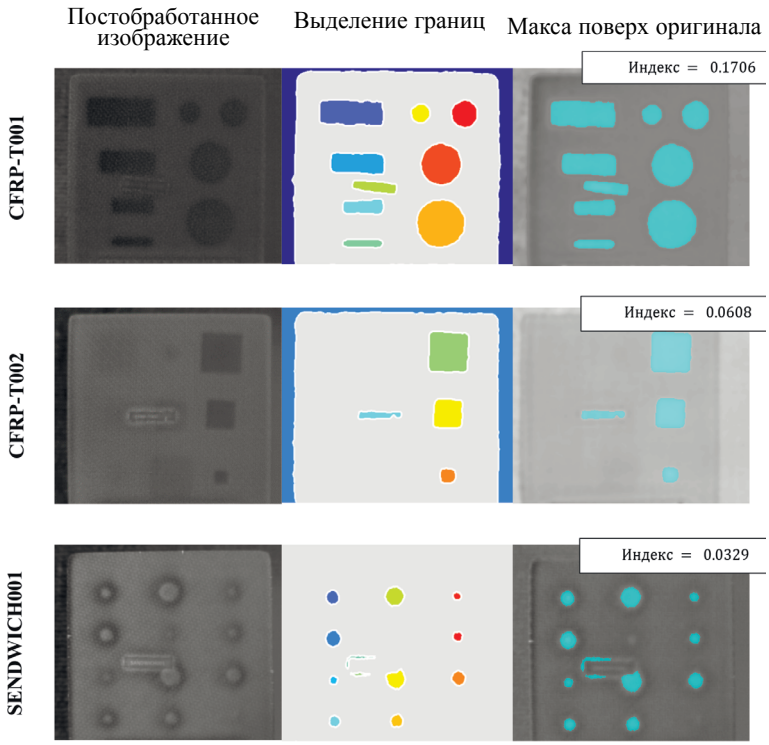

Рис. 7. Обнаруженные дефектные участки после применения алгоритма выделения границ.

были расположены. Авторы считают, что этикетка в виде наклейки на поверхности образца сильно повлияла на результаты. Амплитуда в области вокруг наклейки вызвала ложное смещение среднего арифметического. В результате четкие границы дефекта размывались и не учитывались при определении границ образца.

На следующем этапе результаты оцениваются количественно. Индекс распознавания дефектного участка к общей площади образца определялось как

$$\text{Индекс} = \frac{\text{Количество пикселей дефекта}}{\text{Общее количество пикселей}}. \tag{9}$$

Таким образом, установленный индекс сравнивается с реальным таким индексом и индексом выявления. Реальный индекс рассчитывается на основе известной геометрии образца как отношение общей площади вставок к площади образца. Индекс выявления также рассчитывается на основе известной геометрии образца, но с учетом только дефектов, обнаруженных на термограммах. Поверхность наклейки была прибавлена к общей площади дефектов. Таким образом, алгоритм имеет высокий процент обнаружения дефектов (более 90 % для образцов CFRP-T001 и CFRP-T002). Однако если учесть, что поверхность наклейки прибавляется к общей площади дефектов, этот процент становится немного ниже. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественное сравнение: измеренные индексы и индексы, полученные посредством алгоритма выделения границ (obtained)

	Индекс	Индекс выявления	Реальный индекс
cfrp-t001	0,1706	0,1871	0,1871
cfrp-t002	0,0608	0,0622	0,1867
sendwich001	0,0329	0,0419	0,0430

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм выделения границ по формулам (7), (8) был использован в данной работе. Алгоритм выделения границ объединялся с алгоритмом анализа главных компонент, чтобы улучшить ИК-термографический контроль подповерхностных дефектов. Дефекты моделируются вставкой тефлоновых пластин разного размера на разную глубину. Для использованных образцов с ранее описанной геометрией и смоделированными дефектами можно сделать следующие выводы.

Первичные данные обрабатывались с помощью нескольких алгоритмов: восстановление теплового сигнала, быстрое преобразование Фурье и анализ главных компонент. Наилучший результат был получен с помощью анализа главных компонент. Достигнутый контраст можно улучшить, если использовать двухслойные тефлоновые вставки. Этикетку нельзя размещать в зоне контроля.

Большинство вставок были успешно обнаружены с помощью алгоритма выделения границ. Только некоторые маленькие вставки, которые были расположены на большой глубине, не были обнаружены. Пороговое значение алгоритма выделения границ необходимо регулировать вручную, чтобы определять потенциальные границы для каждой выборки. Авторы будут автоматизировать этот шаг в дальнейших своих исследованиях. Алгоритм будет обновлен известными методами выбора порога, такими как метод Оцу.

После того, как были выделены границы включений (дефектов), алгоритм обнаруживал различные поврежденные участки и удалял фон образца. Этот шаг позволил рассчитать отношение площади дефектной поверхности к общей поверхности образца.

Авторы считают, что таким образом можно снизить субъективность принятия решения оператором. Это может быть первым шагом в автоматизации такого процесса. Таким образом, представленный метод может значительно сократить время контроля и повысить автономность НК.

В дальнейшем авторы обсудят эффективность описанных в статье методов постобработки и эффективность предложенного алгоритма в различных других задачах. Весьма вероятно, что кузов автомобиля, фюзеляж или корпус судна будут подвергаться ударам с низкой или высокой скоростью в течение своего жизненного цикла. Повреждение от удара вызовет перекрытие расслоений на нескольких глубинах. Будет протестировано применение метода обнаружения повреждений от удара.

Работа выполнена при поддержке Rimac-Automobili.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lahiri B.B., Bagavathiappan S., Jayakumar T., Philip John.* Medical applications of infrared thermography // A review. 2012. V. 55(4). doi:10.1016/j.infrared.2012.03.007

2. *Kylili Angeliki, Paris A. Fokaides, Petros Christou, Soteris A. Kalogirou.* Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics // A review. Applied Energy. 2014. V. 134. P. 531—549. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.005

3. *Bagavathiappan S., Lahiri B.B., Saravanan T., Philip John, Jayakumar T.* Infrared thermography for condition monitoring // A review. Infrared Physics & Technology. 2013. V. 60. P. 35—55. doi:10.1016/j.infrared.2013.03.006

4. *Mayr G., Plank B., Sekelja J., Hendorfer G.* Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers. 2011. V. 44(7). P. 537—543. doi:10.1016/j.ndteint.2011.05.012

5. *Simonov Denis, Vavilov Vladimir, Chulkov Arseniy.* Infrared thermographic detector of hidden corrosion // Sensor Review. 2020. V. 40(3). P. 283—289. doi:10.1108/sr-12-2019-0322

6. *Lizaranzu Miguel, Lario Alberto, Chiminelli Agustín, Amenabar Ibán.* Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools // Infrared Physics & Technology. 2015. V. 71. P. 113—120. doi:10.1016/j.infrared.2015.02.006

7. *Bagavac Petra, Krstulović-Opara Lovre, Domazet Željko.* Infrared Thermography of Steel Structure by FFT // Materials Today: Proceedings. 2016. V. 12. P. 298—303. doi:10.1016/j.matpr.2019.03.127

8. *Waugh R.C., Dulieu-Barton J.M., Quinn S.* Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies // NDT & E International. 2014. V. 66. P. 52—66. doi:10.1016/j.ndteint.2014.04.002

9. *Chrysafi A.P., Athanasopoulos N., Siakavellas N.J.* Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing // International Journal of Thermal Sciences. 2017. V. 116. P. 242—253. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.02.017

10. *Ibarra-Castanedo C., Avdelidis N.P., Grenier M., Maldague X., Bendada A.* Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials / Proc. of SPIE. V. 7661. Termosense XXXII, 2010. Retrieved from: https://doi.org/10.1117/12.850733

11. *Shepard M.* United States Patent No. US 8449176B2, 2013.

12. *Shepard M.* Flash Thermography of Aerospace Composites / IV Conferencia Panamericana se END Buenos Aires — Octubre 2007.

13. *Shepard M.* Characterization of Full. Range Time Evolution in Active Thermography. 2014. Retrieved from: http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2014.178

14. *Roche J.-M., Passilly F., Balageas D.* A TSR-Based Quantitative Processing Procedure to Synthesize Thermal D-Scans of Real-Life Damage in Composite Structures // Journal of Nondestructive Evaluation. 2015. V. 34(4). P. 41. https://doi.org/10.1007/s10921-015-0314-8

15. *Balageas D., Roche J.-M., Leroy F.-H.* Comparative Assessment of Thermal NDT Data Processing Techniques for Carbon Fiber Reinforced Polymers // Materials Evaluation. 2017. V. 75. P. 1019—1031.

16. *Ibarra-Castanedo C., Maldague X.* Pulsed Phase Thermography Reviewed // QIRT J. 2004. V. 1(1). P. 47—70.

17. *Rajic N.* Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures // Composite Structures. 2002. V. 58. P. 521—528. https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00161-7

18. *Milovanović B., Banjad Pečur I.* Principle component thermography for defect detection in reinforced concrete structures // Conference: Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, 2016.

19. *Omar M.A., Parvataneni R., Zhou Y.* A combined approach of self-referencing and Principle Component Thermography for transient, steady, and selective heating scenarios // Infrared Physics & Technology. 2010. V. 53(5). P. 358—362. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.06.004

20. *Yousefi B., Sfarra S., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.P.V.* Comparative analysis on Thermal Non-Destructive Testing Imagery applying Candid Covariance-Free Incremental Principal Component Thermography (CCIPCT) // Infrared Physics & Technology. 2007. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.06.008

21. *Ratsakou Almpion, Skarlatos Anastassios, Reboud Christophe, Lesselier Dominique.* Shape reconstruction of delamination defects using thermographic infrared signals based on an enhanced Canny approach // Infrared Physics & Technology. 2020. V. 111. P. 103527. doi:10.1016/j.infrared.2020.103527

22. *Tse Peter, W. Wang Gaochao.* Sub-surface defects detection of by using active thermography and advanced image edge detection // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 842. P. 012029. doi:10.1088/1742-6596/842/1/012029

23. *Bajwa U.I., Vardasca R., Ring F., Plassmann P.* Comparison of boundary detection techniques to improve image analysis in medical thermography // The Imaging Science Journal. 2010. V. 58(1). P. 12—19. doi:10.1179/136821909X12520525092846

24. *Preben Gråberg Nes.* Fast multi-scale edge-detection in medical ultrasound signals. 2012. V. 92 (10), P. 2394—2408. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.02.021

25. *Zhao Yu-qian, Gui Wei-hua, Chen Zhen-cheng, Tang Jing-tian, Li Ling-yun*. IEEE 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference — Shanghai, China (2006.01.17-2006.01.18) / 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference — Medical Images Edge Detection Based on Mathematical Morphology. P. 6492—6495. https://doi.org/10.1109/iembs.2005.1615986

26. *Lopez-Molina C., De Baets B., Bustince H., Sanz, J., Barrenechea E.* Multiscale edge detection based on Gaussian smoothing and edge tracking // Knowledge-Based Systems. 2013. V. 44. P. 101—111. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.01.026

27. *Vavilov V., Xingwang G., Wei S., Yingtao L.* Peculiarities of detecting Teflon defect surrogates in CFRP by transient IR thermography. https://doi.org/10.21611/qirt.2004.019

28. *Ibarra-Castanedo C., Benitez H., Maldague X., Bendada A.* Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. 2007. https://www.researchgate.net/publication/228417761. 2007

29. *Theodorakeas P., Avdelidis N.P., Ibarra-Castanedo C., Koui M., Maldague X.* Pulsed thermographic inspection of CFRP structures: experimental results and image analysis tools. Article in Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering, 2014. https://doi.org/10.1117/12.2044687

30. *Fourier J.* Theorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides–Partie / Memoires de l'Academie des Sciences 4, 1824. P. 185—555.

31. *Mateljan I.* ARTA Program for Impulse Response Measurement and Real Time Analysis of Spectrum Frequency Response. User Manual, Version 1.0.0, Faculty of Electrical Engineering, University of Split, Electroacoustic Laboratory, Split 2004.

32. *Pratt W.K.* Digital Image Processing. New York: Wiley, 1991. 698 p.

33. *Canny J.* A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. P. 679—714.

34. *Acharjya P., Das R., Ghoshal D.* Study and Comparison of Different Edge Detectors for Image Segmentation // Global Journal of Computer Science and Technology. 2012.

УДК 620.179.13

МЕТОД И АППАРАТУРА ИНФРАКРАСНОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© 2021 г. А.О. Чулков[1,*], Д.А. Нестерук[1], Б.И. Шагдыров[1], В.П. Вавилов[1]

[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*
Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30
[*]*E-mail: chulkovao@tpu.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2021; после доработки 28.05.2021;
Принято к публикации 08.06.2021

Описана роботизированная аппаратура и методика комбинированного теплового неразрушающего контроля (НК) крупногабаритных изделий по зонам с последующим синтезом данных. Эффективность комбинирования двух методов — инфракрасного и ультразвукового термографического контроля показана на примере разработанного стандартного образца сложной формы с 18 имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов. Разработанные алгоритмы синтеза результатов испытаний, включающие пространственную «сшивку» набора термограмм и автоматизированную дефектоскопию и дефектометрию с использованием нейронных сетей, проиллюстрировали эффективность предложенного подхода для практического применения.

Ключевые слова: тепловой контроль, композит, дефект, оптическая стимуляция, ультразвуковая стимуляция, синтез данных, автоматизированная дефектоскопия и дефектометрия.

DOI: 10.31857/S0130308221070083

ВВЕДЕНИЕ

В современном неразрушающем контроле (НК) сохраняются тенденции к комбинированию результатов, полученных различными методами испытаний, переходу от дефектоскопии к дефектометрии и оценке рабочего ресурса конструкций, а также автоматизации и роботизации процедур испытаний [1—9]. Для активного теплового контроля (ТК) справедливо утверждение о его преимущественной применимости к композиционным изделиям и многослойным конструкциям сравнительно простой формы, например, обшивкам фюзеляжа самолетов, с целью контроля ударных повреждений и определения количества влаги в сотовых панелях, а также крупногабаритным изделиям ракетной техники правильной формы, например, с целью выявления отслоений теплозащиты [10—14]. Дефекты в композиционных изделиях сложной геометрии, таких как неразборные панели с Т-образными стрингерами, нервюры с крепежными отверстиями, загибами и другими технологическими элементами, которые широко применяются в конструкциях современных самолетов (МС-21, ТВС-2ДТС и др. в России, новые модели корпораций Airbus и Boeing), с трудом выявляются методами ТК, впрочем, как и ультразвуковыми (УЗ) методами [15—19]. Применение томографических принципов при испытаниях композитов, например, с использованием радиационных и УЗ методов, зачастую неэффективно в силу специфики дефектов, низкой производительности испытаний и требований техники безопасности [20—22].

В рамках ТК бóльшая часть исследований последнего времени посвящена разработке новых, в том числе, автоматизированных, алгоритмов обработки данных [23—27]. Однако ряд таких исследований имеют характер математических упражнений и с трудом применимы к зашумленных входным данным.

В настоящей работе описаны исследования, направленные на преодоление «лабораторного» характера ТК при испытаниях композиционных изделий сложной формы со скрытыми дефектами различного вида. Акцент в исследованиях сделан на роботизацию процедуры комбинированного ТК, основанной на синтезе классического ТК и метода УЗ ИК-термографии, что позволяет проводить испытания крупногабаритных изделий сложной формы с удовлетворительной повторяемостью и высокой производительностью. В основе комбинирования методов ТК лежит их взаимное дополнение, что расширяет номенклатуру выявляемых дефектов. Расслоения, непроклеи, избыточная пористость выявляются под действием оптического нагрева галогенными или ксеноновыми лампами, а «слипнутые» дефекты генерируют существенные тепловые сигналы при мощной или маломощной (резонансной) УЗ стимуляции [2, 9, 14]. Второй акцент в исследованиях был сделан на автоматизацию обработки результатов испытаний, а именно, синтез результатов двух методов ТК, пространственную «сшивку» исходных термограмм при контроле по зонам в пано-

рамную термограмму всего объекта контроля, а также автоматизированное выявление скрытых дефектов и оценку их параметров.

СТАНДАРТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТК

Проблема создания стандартных образцов с нормированными дефектами остается актуальной в ТК. Большинство исследований проводят на пластинах с плоскодонными дефектами, аналогичными тем, которые используют в УЗ НК. Для данного исследования был изготовлен стандартный образец из углепластика в виде Ш-образной пластины размером 430×170 мм со средней толщиной стенки 4,4 мм (рис. 1). Коэффициент температуропроводности углепластика в сквозном направлении был определен методом Паркера и составил $2{,}95\times10^{-7}$ м^2/с. Образцы вышеуказанной формы представляют определенные трудности для НК, поскольку скрытые дефекты могут находиться как на участках с плоской геометрией, так и в зонах примыкания стрингера к обшивке (в Т-соединении), а также в зонах технологических отверстий [2]. Следует отметить, что Т-соединения композиционных изделий авиационной техники, в силу технологии их изготовления и специфической геометрии укладки углеродных волокон, представляют зоны, подверженные образованию производственных дефектов [15, 16].

В объекте исследований производственные дефекты в виде расслоений имитировали вставками из экструдированного пенополистирола (ЭП), который обладает теплофизическими характеристиками близкими к воздуху и более эффективен по сравнению с общепринятыми вставками из политетрафторэтилена (тефлона) [15]. Кроме того, в образец были введены вставки из алюминиевой фольги, имитирующие инородные включения с теплопроводностью бóльшей, чем углепластика. Размеры инородных включений варьировались от 10×10 до 20×20 мм и имели толщину от 0,2 до 1 мм. Вставки были расположены между различными слоями углеродной ткани, в том числе, на боковых поверхностях и в среднем стрингере, а также в Т-соединении и углах образца. При изготовлении авиационных панелей со стрингерами, корень Т-соединения заполняют жгутом из углеродных волокон, и при изготовлении образца часть Т-соединения была заполнена только эпоксидной смолой для имитации производственного дефекта.

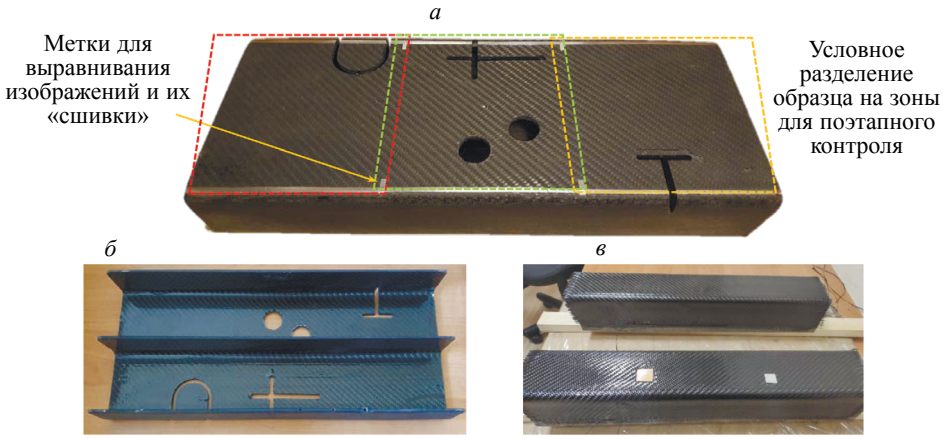

Рис. 1. Стандартный образец из углепластика с имитаторами производственных и эксплуатационных дефектов: *а* — сторона А с маркерами из алюминия (3 зоны контроля обозначены пунктирными линиями); *б* — сторона Б; *в* — укладка вставок из пенополистирола и алюминиевой фольги в процессе изготовления образца.

Кроме расслоений и инородных включений в образец были введены имитаторы других производственных дефектов, которые возникают в изделиях из композитов в зонах механической обработки, например, вокруг крепежных отверстий, если они были выполнены с нарушением технологии. Для имитаций таких дефектов в образце путем фрезерования были проделаны сквозные отверстия различной формы (см. рис. 1). Кромки подобных отверстий обычно имеют незначительные множественные расслоения, подверженные разрастанию под действием механических нагрузок, то есть при эксплуатации. Для выявления таких расслоений целесообразна вибростимуляция в УЗ диапазоне частот от 22 до 60 кГц, реализуемая с помощью магнитострикционных или пьезокерамических преобразователей. Под действием такой стимуляции в зонах трещин и расслоений повышается температура вследствие внутреннего трения краев дефектов.

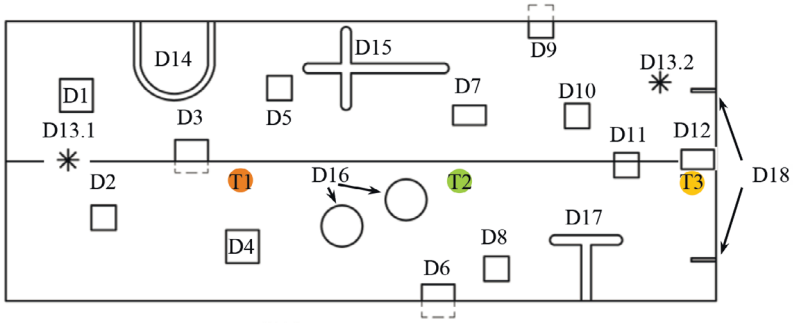

Рис. 2. Схема расположения дефектов (D1—D18) на каждой из сторон образца и расположение точек ввода УЗ колебаний (T1—T3) при роботизированном контроле каждой зоны контроля.

Ряд эксплуатационных дефектов в виде растрескиваний торцов образца были изготовлены путем вкручивания саморезов различных диаметров в несквозные отверстия, заранее выполненные сверлением. Кроме того, со стороны А над Т-соединением и в зоне между стрингерами были нанесены два ударных повреждения с энергией 40 Дж.

Всего в стандартном образце были имитированы 24 дефекта производственного и эксплуатационного характера, однако в данном исследовании проанализировано выявление 18 дефектов лицевой поверхности образца (без боковых и центрального стрингеров). Оптимальные параметры обнаружения дефектов в виде максимального температурного контраста C (%) и времени его проявления $\tau_{max\ c}$ (с) были определены экспериментально в односторонней процедуре ТК при оптическом нагреве. Схема расположения дефектов показана на рис. 2, а их описание и величины C и $\tau_{max\ c}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Описание скрытых дефектов стандартного образца и оптимальные параметры их обнаружения

Номер дефекта	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Тип дефекта	ЭП[1]	ЭП	ЭП	ЭП	Ф[2]	ЭП	ЭП	Ф	ЭП
Поперечные размеры дефекта L, мм^2	20×20	15×15	20×20	20×20	15×15	20×20	20×12	15×15	20×15
Толщина дефекта d, мм	1	0,5	1	1	0,2	1	0,35	0,4	0,35
Глубина дефекта h, мм	1,7	2,2	2,5	3,0	1,1	1,7	1,7	3,0	1,1
C, %	55,2	21,5	17,1	–***	–	14,9	12,1	–	29,9
$\tau_{max\ c}$, с	19,4	17,9	21,1	–	–	23,4	13,8	–	20,4
Номер дефекта	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Тип дефекта	ЭП	ЭП	Т[6]	У[4]	П[3]	П	П	П	НО[5]
Поперечные размеры дефекта L, мм^2	15×15	15×15	20×12	–	50×60	90×50	25**	30×40	10×1,6
Толщина дефекта d, мм	0,5	0,5	3	–	4*	6	–	6	1,6
Глубина дефекта h, мм	1,4	2,2	2	–	–	–	–	–	2,0
C, %	37,4	66,6	69,4	–	–	–	–	–	0,05
$\tau_{max\ c}$, с	17,0	12,9	13,0	–	–	–	–	–	13,6

Примечание: [1]пенополиуретан; [2]алюминиевая фольга; [3]сквозной пропил; [4]ударное повреждение с энергией 40 Дж; [5]группы несквозных отверстий (НО) диаметром 1,6 мм, в которые были вкручены саморезы диаметром 2 и 2,5 мм для инициации расслоений; [6]зона Т-соединения, не заполненная жгутом из углеродных волокон; *ширина пропила; **диаметр пропила; ***дефект не обнаружен при классическом ТК.

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Роботизированная установка позволяет проводить комбинированный ТК крупногабаритных изделий по зонам, причем отдельные термограммы «сшивают» по пространственным координатам в последовательность панорамных термограмм всего изделия. Магнитострикционный преобразователь, оптический нагреватель и тепловизор были закреплены на роботизированном манипуляторе KUKA Kr1100 с помощью кронштейна (рис. 3). Такое размещение средств контроля обеспечивало равномерный оптический нагрев и регистрацию температуры в зоне размерами 270×200 мм, а вводимые УЗ колебания стимулировали всю зону контроля. Кроме того, магнитострикционный преобразователь, создающий значительную тепловую помеху в зоне ввода УЗ колебаний, не попадал в поле зрения тепловизора, что облегчало дальнейшую обработку данных и позволило снизить вероятность «затенения» дефектов преобразователем. Комбинированный ТК каждой зоны контроля сначала проводили путем УЗ стимуляции выбранных точек, а после выравнивания температурного поля контролируемой поверхности применяли оптический нагрев. Таким образом, контроль одной зоны проводили в течение 250 с с учетом перехода от одной зоны контроля к следующей. Роботизированный манипулятор перемещался по запрограммированному треку в автоматизированном режиме с учетом заданного перекрытия зон контроля, чтобы снизить вероятность пропуска дефектов на границах зон контроля.

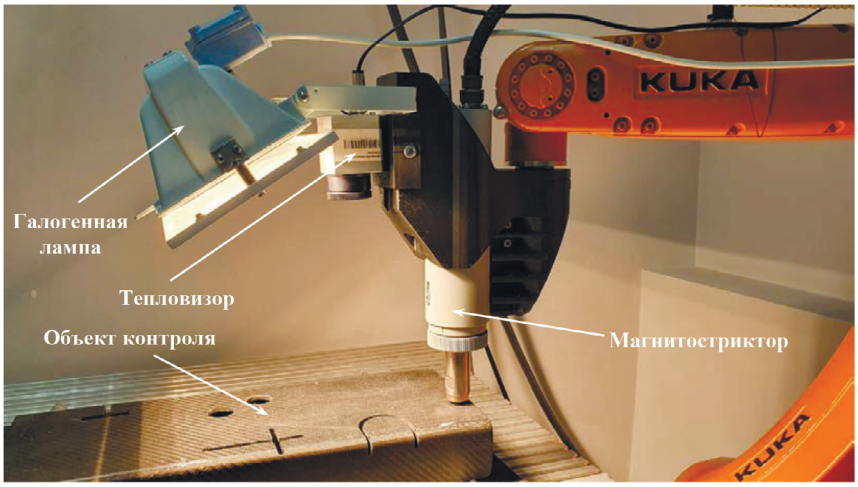

Рис. 3. Роботизированная установка комбинированного ТК (испытания 3-й зоны контроля стандартного образца).

Контролируемое изделие размещали на резиновой подложке, которая предотвращала смещение образца при УЗ стимуляции, а также снижала мощность ультразвука, уходящего в подложку. Электрическая мощность на магнитострикционном преобразователе составляла 300 Вт при длительности стимуляции в каждой точке 10 с, частота УЗ волн была 22 кГц. Нестационарную температуру образца регистрировали тепловизионным модулем Optris PI640 (частота записи 10 Гц, продолжительность записи 100 с). Как при УЗ стимуляции, так и при оптическом нагреве отдельных зон образца, записывали последовательности термограмм для их дальнейшего синтеза, причем параметры последовательностей выбирали одинаковыми при любом способе стимуляции. Длительность тепловой стимуляции с помощью галогенной лампы мощностью 1 кВт также составляла 10 с.

КОМБИНИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИК И УЗ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО НК

На рис. 4*а*, *б* показаны результаты роботизированного ТК в виде термограмм трех зон контроля стандартного образца, полученных при УЗ стимуляции и оптическом нагреве. Неразрушающий контроль при использовании нагревателей различного типа повышает достоверность испытаний за счет селективного выявления дефектов различной природы. Использование УЗ термографического контроля представляется перспективным, поскольку этот метод характеризуется парадоксальной особенностью улучшенного выявления дефектов с малым раскрытием («слипнутых» дефектов).

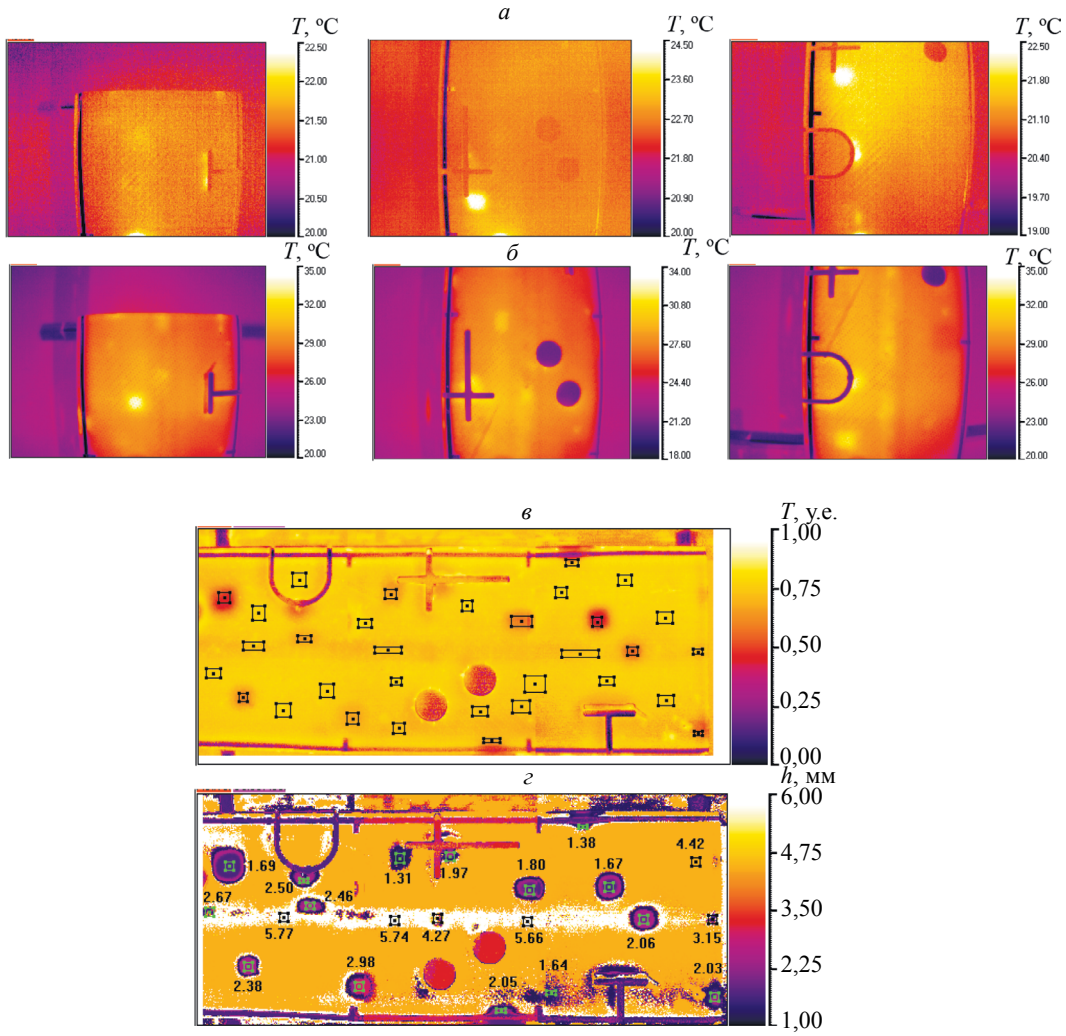

Рис. 4. Результаты ИК и УЗ термографического контроля, полученные путем суммирования и нормировки соответствующих изображений:

а — оптимальные термограммы 3-х зон при УЗ нагреве через 11 с после начала стимуляции (слева – стимуляция в точке Т1, в центре — в точке Т2, справа — в точке Т3); *б* — оптимальные термограммы 3-х зон при оптическом нагреве через 11 с после начала нагрева; *в* — панорамное изображение последовательности, «сшитой» из синтезированных данных ИК и УЗ термографического контроля (обработано методом ТРС, данные нормированы по амплитуде в диапазоне от 0 до 1); *г* — панорамная карта глубин дефектов, полученная из последовательности панорамных изображений (*в*) с помощью НС.

Панорамное изображение последовательности, «сшитой» из синтезированных данных УЗ и оптического нагрева, показано на рис. 4*в*. Синтез проводили путем суммирования нормализованных результатов контроля, полученных при УЗ стимуляции и оптическом нагреве. Искажения видимой на термограммах формы образца, связанные с широкоугольным объективом тепловизора, исправляли с помощью программного модуля ImageProcessing перед их сшивкой в панорамную последовательность. Сшивку результатов контроля отдельных зон поводили в соответствии с нанесенным на поверхность образца маркерами (см. рис. 1). Полученная последовательность панорамных термограмм была обработана методом термографической реконструкции сигнала (ТРС) [28] и нормирована в диапазоне от 0 до 1. На изображении рис. 4*в* обозначены дефектные и бездефектные области, которые были использованы при сборе входных данных, предназначенных для обучения нейронной сети (НС). Структура использованной НС и методика ее обучения описаны в [23]. Целями при обучении НС являлись истинные глубины залегания дефектов и толщина образца. На рис. 4*г* приведена карта глубин, полученная с помощью НС. Шкала цветов справа от изображений показывает толщину и глубину залегания дефектов в миллиметрах.

В табл. 2 приведены результаты дефектометрии, полученные с помощью НС. Наибольшая ошибка определения глубины (45 и 58 %) относится к дефектам D8 и D12 соответственно, что

Таблица 2

Результаты автоматизированной дефектометрии (стандартный образец рис. 2)

Номер дефекта	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
Истинная глубина дефекта *h*, мм	1,7	2,2	2,5	3,0	1,1	1,7	1,7	3,0	1,1	1,4	2,2	2,0
Результат дефектометрии с использованием НС *h*, мм	1,69	2,38	2,46	2,98	1,31	2,05	1,80	1,64	1,38	1,67	2,06	3,15
Ошибка определения глубины *E*, %	1	8	2	1	19	21	6	45	25	19	6	58

связано с характером температурных сигналов от этих дефектов. Дефект D8, который представляет собой включение из фольги толщиной 0,4 мм, расположенное на глубине 3 мм, практически не выявляется ни при оптической, ни при УЗ стимуляции. В результате, для этого дефекта входные данные при обучения НС подобны данным бездефектной области. Для дефекта D12 цель обучения НС (глубина 2,0 мм) не соответствовала температурным профилям в данной дефектной области. Дефект D12 представляет собой зону Т-соединения, не заполненную жгутом из углеродных волокон, и он не относится к классу ЭП дефектов (см. табл. 1). Следует отметить, что дефекты D6 и D9, ошибка определения глубины которых превышает 20 %, расположены на углах образца, что изменяет профили температурных сигналов.

Суммируя вышесказанное, методика комбинированного ИК и УЗ термографического контроля крупногабаритных изделий сводится к следующему:

объект контроля условно делят на зоны, размеры которых обусловлены параметрами тепловизора и источника нагрева, а также геометрией изделия;

на объект контроля наносят маркеры из материала с высоким коэффициентом отражения таким образом, чтобы при визировании каждой зоны в поле зрения тепловизора попадали маркеры соседних зон;

экспериментально или путем моделирования определяют оптимальные параметры проведения НК при оптической стимуляции, а также определяют оптимальное расположение точек ввода ультразвука;

проводят УЗ термографический контроль первой зоны, используя УЗ стимуляцию выбранных точек; после выравнивания температуры изделия проводят ТК той же зоны с использованием оптической стимуляции, устанавливая одинаковые параметры записи для обоих видов стимуляции;

после проведения комплексного контроля первой зоны объект/средства контроля перемещают таким образом, чтобы в поле зрения тепловизора попадала следующая зона, контроль которой проводят в той же последовательности, что и первой зоны;

полученные последовательности термограмм обрабатывают, используя ряд известных процедур, например, метод анализа главных компонент, после чего синтезируют результирующие изображения, которые комбинируют результаты применения двух методов НК;

синтезированные последовательности термограмм каждой зоны также целесообразно подвергнуть дополнительной обработке для последующего использования нейронной сети, в частности, хорошо зарекомендовавшим себя методом ТРС [18];

термоизображения отдельных зон подвергают геометрическому выравниванию (программный модуль ImageProcessing (НИ ТПУ)), после чего сшивают в панорамную последовательность с перекрытием не менее 5 %; панорамные изображения обрабатывают с помощью нейронной сети для осуществления автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разработки алгоритма комбинированного ИК и УЗ контроля крупногабаритных изделий сложной формы изготовлен стандартный образец Ш-образной формы из углепластика, соответствующий элементам самолетной обшивки со стрингерами. В образце имитированы 24 производственных и эксплуатационных дефекта в виде инородных включений, расслоений и ударных повреждений. Коэффициент температуропроводности углепластика в сквозном направлении составил $2{,}95\times10^{-7}$ м^2/с, что соответствует теплофизическим характеристикам композитов, используемых в авиационной и ракетно-космической промышленности. Установлено, что в образцах из углепластика для имитации скрытых дефектов в виде расслоений толщиной от 0,2 до 1 мм целесообразно использовать вставки из экструдированного пенополистирола.

Для проведения комбинированного ИК и УЗ термографического контроля создана роботизированная установка, включающая источник нагрева на галогенных лампах, магнитострактор и тепловизор и осуществляющая автоматизированный НК крупногабаритных изделий по зонам с применением поочередной УЗ и оптической стимуляции.

Разработана методика синтеза панорамных термоизображений крупногабаритных изделий из комбинированных термограмм отдельных зон, «сшивку» которых производят с учетом геометрических искажений, обусловленных расположением тепловизора относительно объекта контроля и примененной оптикой. Панорамные изображения могут быть использованы в качестве входных данных для НС при проведении автоматизированной дефектоскопии и дефектометрии.

Настоящее исследование выполнено при поддержке грантов РНФ № 17-19-01047п (моделирование обработка данных), РФФИ №19-29-13004 (стандартный образец, экспериментальные исследования), а также Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета (экспериментальная аппаратура).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Madruga F.J., Sfarra S., ReaL E., Gargiulo G., Conde O.M., López-Higuera J.M.* Complementary Use of Active Infrared Thermography and Optical Coherent Tomography in Non-destructive Testing Inspection of Ancient Marquetries // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. V. 39. https://doi.org/10.1007/s10921-020-00683-4

2. *Chulkov A.O., Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Bedarev A. M., Yarkimbaev Sh., Shagdyrov B.I.* Synthesizing Data of Active Infrared Thermography under Optical and Ultrasonic Stimulation of Products Made of Complex-Shaped CFRP // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 7. P. 595. [*Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И.* Синтез данных при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы с использованием активной инфракрасной термографии // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 54—60.]

3. *Shark L.K., Matuszewski B.J., Smith J.P., Varley M.R.* Automatic feature-based fusion of ultrasonic, radiographic and shearographic images for aerospace NDT // Insight. 2001. V. 43. No. 9. P. 607—615.

4. *Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K.* NDT data fusion at pixel level // NDT & E International. 1999. V. 32. P. 283292.

5. *Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М.* Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии // Вестник ПНИПУ Механика. 2019. № 1. С. 1—12.

6. *Khodayar F., Lopez F., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.* Optimization of the Inspection of Large Composite Materials Using Robotized Line Scan Thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. 36(2).

7. https://www.safran-nacelles.com/media/safran-nacelles-launches-new-automated-non-destructive-testing-solution-using-infrared-thermography-and-augmented-reality-world-first-20170404

8. https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Demystifying-Robot-Offline-Programming/content_id/7467

9. *Gholizadeh S.* A review of non-destructive testing methods of composite materials // Procedia Structural Integrity. 2016. V. 1. P. 50—57.

10. *Verspeek S., Gladines J., Ribbens B., Maldague X., Steenackers G.* Dynamic line scan thermography optimisation using response surfaces implemented on PVC flat bottom hole plates // Applied Sciences (Switzerland). 2021. 11(4). P. 1—15.

11. *Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П., Шильников Г.В., Перепелица А.А., Щепелин В.Я.* Автоматизированный тепловой неразрушающий контроль крупногабаритных изделий // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. № 1. С. 56—59.

12. *Клюев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Пичугин А.Н., Козельская С.О.* Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. М.: Изд-ский дом «Спектр», 2017. 200 с.

13. *Каледин В.О., Вячкина Е.А., Галдин Д.А., Будадин О.Н., Козельская С.О.* Электросиловая термография конструкций из композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 22—27.

14. *Будадин О.Н., Вячкин Е.С., Вячкина Е.А., Каледин В.О., Козельская С.О.* Экспериментальные исследования ультразвуковой тепловой томографии (уз-термотомографии) композитных материалов // Контроль. Диагностика. 2019. № 6. С. 56—60.

15. *Vavilov V., Chulkov A., Dubinskiy S., Burleigh D.* Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods // Polymer Testing. 2020. 94. No. 2. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107012

16. *Dubinskii S.V., Safonov A.A.* Composite-Friendly Approach to Certification of Advanced Materials and Fabrication Methods Used in Aviation Industry // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2017. V. 46. No. 5. P. 501—506. https://doi.org/10.3103/s1052618817050041

17. *Dubinskii S., Fedulov B., Feygenbaum Y., Gvozdev S., Metelkin E.* Experimental evaluation of surface damage relaxation effect in carbon-fiber reinforced epoxy panels impacted into stringer // Composites Part B: Engineering. 2019. V. 176.

18. *Towsyfyan H., Biguri A., Boardman R., Blumensath T*. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. V. 33. P. 77—791.

19. *Dubinskii S.V., Sevastyanov F.S., Golubev A.Y., Denisov S.L., Kostenko V.M., Zharenov I.A*. A computational and experimental study of the effect of vibroacoustic loads on the structural performance of composite skin-stringer joint // Acoustical Physics. 2019. V. 65. P. 359—368.

20. *Towsyfyan H., Biguri A., Boardman R*. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures // Chinese J. of Aeronautics. 2020. V. 33. P. 771—791.

21. *Karabutov A.A., Podymova N.B*. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CFRP laminates // J. Nondestr. Eval. 2014. V. 33. P. 141—151.

22. *Pelivanov I., Buma T., Xia J., Wei C.-W., O'Donnell M.* A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. https://doi.org/10.1063/1.4868463

23. *Chulkov A., Nesteruk D., Vavilov V., Shagdirov B., Omar M., Siddiquic A., Prasad Y.* Automated procedure for detecting and characterizing defects in GFRP composite by using thermal nondestructive testing // Infrared Physics & Technology. 2021. P. 103675.

24. *Fang Q., Maldague X.* A method of defect depth estimation for simulated infrared thermography data with deep learning // Applied Sciences. 2020. V. 10.

25. *Müller D., Ehlen A., Valeske B*. Convolutional Neural Networks for Semantic Segmentation as a Tool for Multiclass Face Analysis in Thermal Infrared // J. Nondestruct Eval. 2021. V. 40. https://doi.org/10.1007/s10921-020-00740-y

26. *Garrido I., Erazo-Aux J., Lagüela S., Maldague X., Arias P.* Introduction of deep learning in thermographic monitoring of cultural heritage and improvement by automatic thermogram pre-processing algorithms // Sensors (Switzerland). 2021. V. 21. P. 1—44.

27. *Numan S., Omar M.A., Abdulrahman Y.* A neural network approach for quantifying defects depth, for nondestructive testing thermograms // Infrared Physics & Technology. 2018. V. 94. P. 55—64.

28. *Shepard S.M., Lhota J.R., Rubadeux B.A., Wang D., Ahmed T.* Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences // Opt. Eng. 2003. V. 42. P. 1337—1342.